Considerações sobre o clima e a sua história

II
Factores Astronómicos

Faro
Portugal

“Todo o mundo é composto de mudança”

Considerações sobre o clima e a sua história

II

Factores Astronómicos

J. Alveirinho Dias

Faro
Portugal
2016

“Todo o mundo é composto de mudança”
Considerações sobre o clima e a sua história
II - Factores astronómicos

Índice

“Todo o mundo é composto de mudança”
Considerações sobre o clima e a sua história

II
Factores astronómicos *

II.1. A Terra, corpo astronómico

II.1.1. A Terra, "pálido ponto azul”

Em 1977, a NASA (National Aeronautics and Space Administration) enviou para o espaço duas sondas, a Voyager 1 e a Voyager 2, lançadas respectivamente a 12 e a 20 de Agosto, cuja missão era a de explorar os planetas externos do sistema solar, seguindo depois para o espaço interestelar. Prevendo a possibilidade de, num futuro distante, uma dessas sondas ser eventualmente encontrada por outros seres vivos inteligentes, em cada uma foi colocado um disco de cobre revestido a ouro contendo imagens e sons da Terra, saudações em 55 línguas (incluindo a portuguesa), bem como instruções iconográficas sobre a forma de tocar o disco, a localização do sistema solar relativamente a 14 pulsares, e o desenho de um átomo de hidrogénio. As Voyager cumpriram a sua missão primária com pleno êxito, produzindo valiosíssimos resultados científicos. Actualmente encontram-se fora do sistema solar, a Voyager 1 a mais de 20 mil milhões de quilómetros do Sol e a Voyager 2 a cerca de 17 mil milhões de quilómetros. Após mais de 38 anos do seu lançamento, continuam a receber comandos de rotina e a transmitir dados importantes para a Terra.

Quando a Voyager 1 tinha já passado a órbita de Plutão e estava a entrar na distante periferia do sistema solar, a pedido do conhecido cientista Carl Sagan (1934-1996), a 14 de Fevereiro de 1990 foram enviadas instruções a essa sonda para virar a sua câmara para trás e tirar fotografias dos planetas que havia visitado. Com as cerca de 60 imagens obtidas a NASA criou um mosaico único do nosso sistema Solar. Numa das imagens recebidas, por entre o granulado e no meio das bandas resultantes da difracção da luz solar nas lentes da câmara, surge um pequeno ponto brilhante com a dimensão de um pixel, um "pálido ponto azul” como lhe chamou Carl Sagan, que é a nossa Terra (Figura II.1), o planeta que nos gerou e que co-habitamos, vista a 6,4 mil milhões quilómetros de distância.

Esta imagem suscita reflexões aprofundadas sobre a nossa existência e importância no mundo e no Universo. Vivemos num pequeno e pálido ponto azul, que é um dos vários planetas que orbita o Sol, a qual é uma estrela entre outros 100 mil milhões de estrelas que compõem a galáxia, que é apenas uma das mais de 200 mil milhões de galáxias que existem no universo.

---

* Algumas partes deste texto foram extraídas ou adaptadas de Dias (2015) - “E o Azul se fez Homem. Parte I - A Génese do Ambiente”.

Porém, como referiu Carl Sagan no início do seu livro precisamente intitulado "Pálido Ponto Azul", *vista a esta distância, a Terra pode parecer não ter qualquer interesse particular. Mas para nós, é diferente. Considere-se novamente esse ponto. Esse ponto é o aqui. É a nossa casa. Somos nós. É nele que todos os que amamos, todos os que conhecemos, todos de quem se ouviu falar, todos os seres humanos que existem e já existiram, vivem e viveram as suas vidas. É o conjunto da nossa alegria e sofrimento, de inúmeras religiões confiantes, de ideologias e de doutrinas económicas, de todos os caçadores e colectores, de todos os heróis e covardes, de todos os criadores e destruidores de civilizações, de todos os reis e camponeses, de todos os casais jovens apaixonados, de todas as mães e pais, de todas as crianças cheias de esperança, de todos os inventores e exploradores, de todos os professores de moral, de todos os políticos corruptos, de todas as "superstars", de todos os líderes supremos, de todos os santos e pecadores que existiram na história da nossa espécie, ali - num grão de poeira suspenso num raio de Sol.*
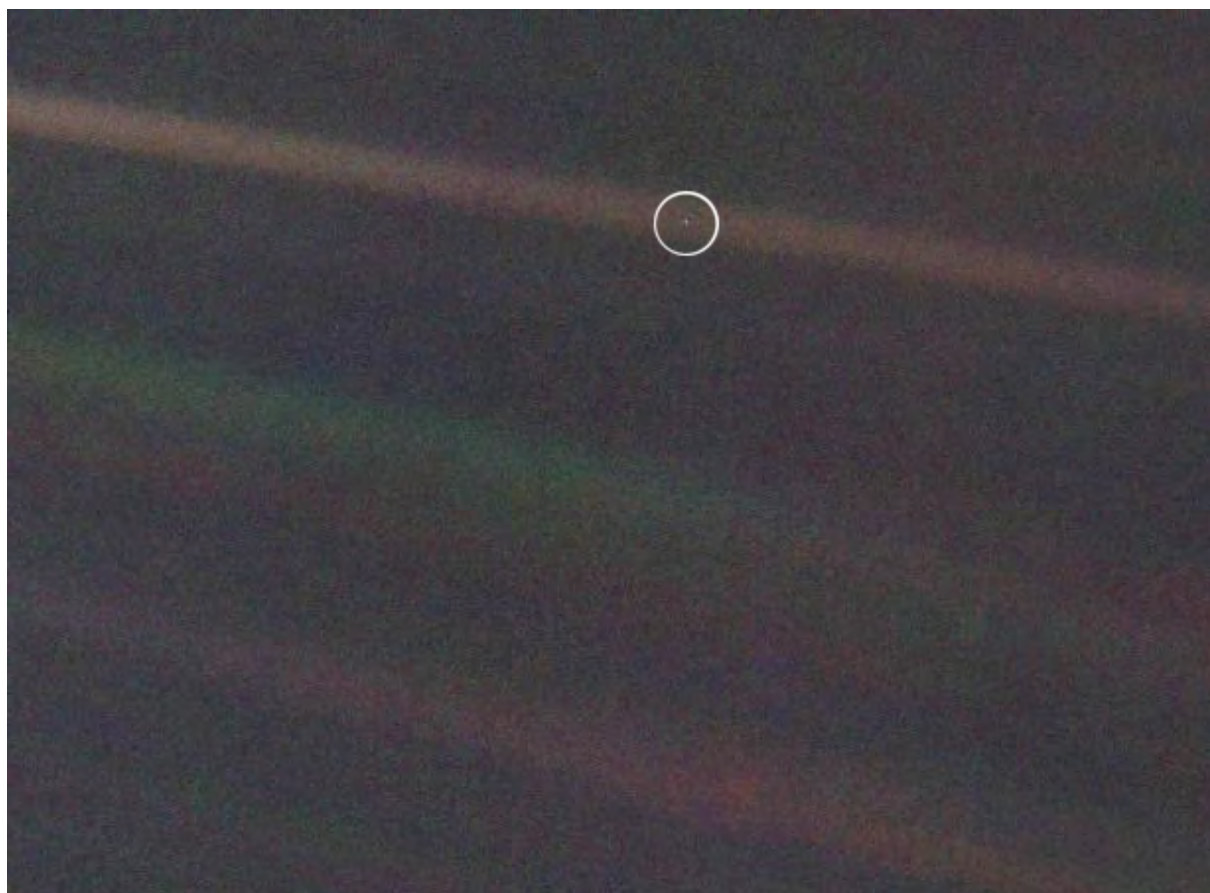
Figura II.1 – A Terra vista de 6,4 mil milhões quilómetros de distância, em que aparece como um "pálido ponto azul". A imagem foi composta pela NASA a partir de três fotografias diferentes utilizando filtros azul, verde e violeta.

A Terra é o único mundo conhecido, até hoje, que abriga vida. Não há outro lugar, pelo menos no futuro próximo, para onde a nossa espécie possa emigrar. (...). *Gostemos ou não, a Terra é onde temos que viver* (...). *Talvez não haja melhor demonstração da tolice das vaidades humanas do que esta distante imagem de nosso mundo minúsculo. Para mim, ressalta a nossa responsabilidade de nos tratarmos melhor uns aos outros e de preservarmos e protegermos o "pálido ponto azul", o único lar que conhecemos.*

Foi este "pálido ponto azul" que, através de uma conturbada evolução de mais de 4,5 mil milhões de anos, acabou por criar o Homem. Somos um produto do "pálido ponto azul". É errado pensar que existe o Homem e a Terra. Não são entidades separadas; são uma e única entidade. O Homem é apenas uma das muitas partes integrantes desse sistema complexo que é a Terra. O Homem é apenas uma das 30 milhões de espécies que se estima existirem no nosso planeta, das quais apenas 3 milhões estão cientificamente classificadas.

II.1.2. Viajamos a velocidades astronómicas

Sendo um planeta integrado no sistema solar, é natural que a Terra seja profundamente influenciada pela estrela de que esse sistema depende, e, em maior ou menor grau, por interacções com outros corpos celestes. Por essa razão, o clima da Terra é estruturalmente influenciado por factores astronómicos que actuam em diversificadas escalas temporais, que variam entre os muitos milhões de anos e os minutos.

Embora não nos apercebamos disso, pois que o nosso referencial é a Terra, viajamos no espaço a velocidades que, para o que estamos habituados no nosso quotidiano, são absolutamente vertiginosas. Cada ponto da superfície terrestre descreve uma órbita circular em cerca de 24 horas, isto é, num dia terrestre. Como tudo o que se refere aos movimentos astronómicos, em que todos os objectos se deslocam relativamente aos outros, as coisas são menos simples do que aparentam ser numa primeira análise. Uma das formas de determinar a duração do dia é medir o tempo que decorre entre o Sol atingir o seu ponto mais alto no céu duas vezes consecutivas. É o chamado "dia solar", que tem ligeiras variações ao longo do ano devido à órbita de translação da Terra em torno do Sol não ser perfeitamente circular e a outras perturbações de índole astronómica. No sentido de ter uma duração mais constante, em astronomia utiliza-se o "dia sideral", ou seja, o tempo que um determinado ponto, referenciado geometricamente a estrelas distantes (consideradas fixas), demora, após uma rotação, a ocupar a mesma posição relativamente a essas estrelas. O dia sideral tem a duração de 23 horas, 56 minutos e 4,0916 segundos, equivalente a menos cerca de 4 minutos do que o dia solar médio ou, mais exactamente, 0,99726958 dias solares médios.

Assim, se considerarmos que a Terra no equador tem um perímetro de 40 075 km, facilmente se conclui que cada ponto se desloca, aí, à velocidade de cerca de 1 674,4 km/h, ou seja, a cada segundo percorre 465,1 m. Como a distância da superfície terrestre ao eixo de rotação diminui progressivamente do equador para os pólos, a velocidade referida vai também diminuindo proporcionalmente. Por exemplo, à latitude de 40º, onde o perímetro da circunferência em torno do eixo de rotação é de cerca de 30 600 km, a velocidade é de, aproximadamente, 1 278,5 km/h. Nos pólos geográficos, localizados no eixo de rotação, a velocidade é essencialmente nula.

Como a Terra descreve, ao longo de 365,256 dias (um ano sideral), uma órbita quase circular em torno do Sol, cujo perímetro é de cerca de 940 milhões de quilómetros, tal significa que viajamos a uma velocidade de, aproximadamente, 107 230 km/h, ou seja, a cada segundo percorremos cerca de 29,8 km. Claro que, se quisermos ser um pouco mais rigorosos e abrangentes, a esta velocidade temos que fazer a adição algébrica da velocidade de rotação. Assim, em contas redondas, para pontos situados no equador, a velocidade conjugada é de 119 509 km/h quando a deslocação é no sentido da translação, e de 94 952 km h quando o sentido é inverso.

Mas o nosso sistema solar tem, também, um movimento de translação em torno da nossa galáxia, deslocando-se à velocidade média de 792 000 km/h, isto é, a cada segundo percorremos cerca de 220 km. Se tivermos em consideração que a nossa galáxia se desloca no

universo a aproximadamente 2 268 000 km/h (cerca de 630 km/s), a velocidade a que nos deslocamos no espaço, sem o sentirmos minimamente, é impressionante. É caso para dizer, com toda a propriedade, que viajamos através do espaço sideral a velocidades astronómicas.

Se nos detivemos um pouco mais neste assunto, é porque tal permite olharmos para o planeta que coabitamos numa perspectiva a que não estamos habituados no nosso quotidiano, a qual podemos designar por dimensão astronómica. Basicamente, para percebermos melhor a Terra e o seu clima, é imprescindível termos em devida consideração o facto do nosso planeta estar integrado no sistema solar, o qual está totalmente dependente da sua estrela central, o Sol, onde os fenómenos se desenvolvem, em geral, a escalas temporais e espaciais profundamente diferentes das que estamos habituados no nosso dia a dia.

II.1.3. A formação da Terra (e do clima)

Longe vão já os tempos em que o criacionismo dominava estritamente o pensamento e as acções do Homem, e em que o conteúdo da Bíblia era aceite, de forma literal, como verdade insofismável. Foi nesses tempos que James Ussher (1581 – 1656), Arcebispo de Armagh, na Irlanda, com base no estudo dos acontecimentos narrados no Livro Sagrado, estabeleceu a cronologia dos acontecimentos bíblicos, tendo nomeadamente concluído que Deus criou o mundo "na noite anterior ao dia 23 de Outubro do ano 710 do calendário juliano" (ou seja, do ano 4004 antes de Cristo).

Embora tal tenha prevalecido como verdade, na sociedade em geral, até meados do século XIX, a progressiva ampliação dos conhecimentos científicos fez com que muitos intelectuais fossem, a pouco e pouco, tendo uma visão diferente do assunto. Foi, por exemplo, o caso do filósofo prussiano Immanuel Kant (1724 - 1804), que, com base nos princípios da Mecânica de Newton, publicou em 1755 a teoria de que o sistema solar se teria constituído a partir de uma nebulosa, uma vasta nuvem de gás e poeiras, que girava lentamente, e que, gradualmente, se achatou e colapsou, dando origem ao Sol e aos planetas. A teoria viria a ser retomada, um pouco mais tarde, em 1796, pelo matemático e astrónomo francês Pierre-Simon de Laplace (1749-1827). Embora com muitas modificações, na essência é, ainda hoje, a teoria que é aceite quase consensualmente pela comunidade científica.

As modernas técnicas isotópicas de datação permitem deduzir que essa formação do sistema solar ocorreu há aproximadamente 4,6 mil milhões de anos, pois que meteoritos contendo materiais sólidos que são mais ou menos contemporâneos da formação do sistema solar têm idades dessa ordem. Os meteoritos mais interessantes neste aspecto são os condritos, meteoritos rochosos (portanto, não metálicos), que não foram modificados devido a fusão ou diferenciação do corpo de origem, e que contêm côndrulos, isto é, esférulas de dimensão milimétrica de minerais ricos em silicatos, como a olivina e a piroxena, e inclusões ricas em cálcio e alumínio, que têm sido interpretados como resultantes de impactos violentos entre asteróides formados por condensação e aglomeração da poeira cósmica existente na nébula que viria a dar origem ao sistema solar. Um desses meteoritos é o de Allende, que caiu, em 1969, no estado mexicano de Chihuahua, cujos côndrulos têm idade de 4,5672 mil milhões de anos. Com base no estudo dos isótopos, como o ^{60}Fe, destes côndrulos, o astrónomo norte-americano Jonathan P. Williams pode concluir que uma ou mais supernovas teriam surgido nas imediações da nébula que viria a formar o sistema solar, e que teriam sido as ondas de choque por elas formadas que, gerando regiões super-densas nessa nébula, causaram o colapso dessas regiões, iniciando o processo de formação do Sol e dos planetas.

Embora o conjunto completo de processos intervenientes seja ainda pouco conhecido e a cronologia exacta careça ainda de maior precisão, a sequência de acontecimentos parece ter

sido relativamente rápida. Possivelmente, a constituição inicial do corpo estelar do nosso sistema teria demorado menos de 1 milhão de anos (Ma) e o início da formação dos corpos do sistema solar teria ocorrido mais ou menos na mesma altura, embora de forma mais lenta. Por colapso gravitacional, a nuvem molecular (e de poeiras) que constituía a nebulosa solar teria começado a rodar em torno da estrela em formação, adquirindo forma mais achatada. Nestas condições, devido à atracção gravitacional entre os inúmeros elementos presentes na aludida nuvem de partículas, ter-se-iam começado a constituir planetesimais (elementos sólidos maiores) que, orbitando o Sol de formas heterogéneas, chocavam frequentemente uns com os outros, atraindo os corpos maiores os mais pequenos. Por acreção, alguns dos planetesimais foram progressivamente aumentando de dimensões, convertendo-se em planetóides e protoplanetas e, posteriormente, em verdadeiros planetas. Através destes processos, o sistema planetário que orbita o Sol ter-se-ia constituído, na essência, em cerca de 100 milhões de anos após a formação dessa estrela.

Os conhecimentos existentes parecem indicar que a segregação do planeta Terra se verificou cerca de 60 Ma após o início da formação do sistema solar, tendo o processo de acreção principal demorado uns 10 a 20 Ma. Assim, pode dizer-se que a Terra nasceu há aproximadamente 4,5 mil milhões de anos. Era um planeta profundamente diferente do que hoje conhecemos: a superfície correspondia, na maior parte, a um oceano de materiais fundidos, sujeito a intenso bombardeamento por asteróides. A Terra tinha já uma atmosfera, a qual era essencialmente constituída por azoto, amónia, hidrogénio, monóxido de carbono, metano e vapor de água expelidos pelos vulcões, além de grande quantidade de enxofre. Tinha já, portanto, um clima, embora, perante as condições que então existiam, seja difícil de imaginar quais seriam as características desse clima. Era, em certo sentido, uma visão do inferno, pelo que o geólogo norte-americano Preston Cloud (1912 - 1991) designou, em 1972, estes primeiros tempos da Terra (desde que se constituiu como planeta até há 4 mil milhões de anos) por Hadeano, recorrendo ao termo *Hades* da mitologia grega, que designava tanto o mundo inferior ou submundo (os infernos da terminologia posterior), como o deus que governava esse mundo.

II.2. A criação de factores modeladores do clima

II.2.1. O nascimento da Lua

Embora a Terra estivesse já constituída como planeta e manifestasse tendência para arrefecimento da sua superfície, o processo de acreção prosseguiu através da integração da grande quantidade de materiais que, provenientes do espaço, nela caíam. Há 4,5 mil milhões de anos a Terra teria já cerca de metade da massa actual. Foi mais ou menos nessa altura que se verificou a enorme colisão de um planetóide com a Terra, que, entre outras consequências, provocou a inclinação do seu eixo rotação, o que viria a revelar-se absolutamente determinante para que o nosso planeta adquirisse as características que lhe conhecemos, as quais contribuíram, mais tarde, para o desenvolvimento da biosfera e que, muito mais recentemente, culminaram no aparecimento do próprio homem. Esse planetóide, possivelmente com dimensões semelhantes à de Marte, foi apelidado, pelo geoquímico britânico Alexander Halliday, em 2000, por Teia, em alusão à titânide com esse nome, da mitologia grega, mãe de Selene, a deusa da Lua.

Grande parte dos materiais que compunham o planetóide Teia foram integrados na Terra. Todavia, devido ao processo de colisão, extremamente violento, porção significativa dos materiais, talvez equivalente a 20% da massa original de Teia, foi ejectado para o espaço, tendo parte sido aprisionado pela gravidade terrestre, ficando a orbitar o planeta. Esses materiais começaram rapidamente a coalescer, acabando por formar a Lua. Independentemente de qual fosse a velocidade de rotação e a inclinação do eixo da Terra antes da colisão, esta fez com que esse eixo ficasse permanentemente inclinado relativamente ao plano da eclíptica, que o movimento de rotação fosse retardado (acrescentando, na altura, mais cerca de 5 horas à duração do dia), e que o equador da Terra e a órbita da Lua se tenham tornado aproximadamente coplanares.

Foram alterações absolutamente decisivas para toda a história posterior da Terra. Basta recordar que a inclinação do eixo de rotação determina as diferentes quantidades de energia solar que o planeta recebe na zona equatorial e nas regiões polares, tendo, por consequência, importância estruturante no que ao clima se refere. Se essa inclinação tivesse adquirido valor muito diferente dos cerca de vinte e três graus, o nosso clima ter-se-ia tornado inóspito, provavelmente inibidor do desenvolvimento de vida superior. Por outro lado, a influência da Lua fez com que a obliquidade da Terra tivesse ficado rapidamente estabilizada. Caso o nosso planeta não tivesse adquirido o seu satélite natural, as influências astronómicas (ressonâncias orbitais e várias outras) teriam imprimido à inclinação do eixo comportamento variável, mais ou menos caótico, com a obliquidade a variar, possivelmente, ente 0º e cerca de 85º nalguns milhões de anos, o que induziria modificações climáticas relativamente rápidas de muito grande amplitude. Nestas condições, a evolução da vida tornar-se-ia difícil, até porque ocorreriam, devido a essas grandes mudanças climáticas e a outros factores correlatos, frequentes extinções em massa. A existência da Lua permitiu a estabilização do eixo de rotação em torno dos 23º, apenas com pequenas variações inferiores a 2º, tornando-a, assim, num dos principais reguladores climáticos da Terra. O nosso planeta adquiriu, desta forma, condições de equilíbrio, sem as quais muito dificilmente os seres vivos teriam evoluído até formas superiores.

Portanto, o mundo é tal como o conhecemos, em muito devido a essa grande colisão do planetóide Teia com a Terra, logo no início da existência desta. É devido a esse evento altamente energético que hoje temos as estações do ano e, por consequência, as épocas das sementeiras e das colheitas, a beleza multicolorida das florações primaveris, os períodos balneares estivais que nos permitem usufruir das ondas de águas tépidas percorrendo nossos

corpos, e toda uma série vasta de actividades que tipificam de forma indelével a nossa vida contemporânea. Foi devido a essa colisão que temos as marés lunares, sendo relevante referir que os charcos de maré, isto é, as zonas costeiras que permanecem inundadas após a maré baixar, tiveram importância fundamental para que alguns organismos marinhos tivessem a possibilidade de se adaptar ao ambiente subaéreo (de terra firme). Foi também devido a essa colisão que existem os movimentos migratórios de muitos animais (aéreos, terrestres e marinhos), nomeadamente os das andorinhas que, na Primavera, com seus voos acrobáticos e a construção ou ocupação dos ninhos nos beirais de nossas casas nos transmitem implicitamente mensagens de uma Natureza em renovação. Foi Teia, também, a responsável pela existência das florestas caducifólias (de árvores de folha caduca) que, no período outonal, principalmente nas latitudes médias, nos inebriam a visão com o espectáculo matizado das folhas que, prestes a cair, abandonam o verde típico e adquirem tonalidades policromáticas, numa maravilhosa paleta de amarelos e castanhos cromatizados com tons laranja, vermelho e roxo. Foi ainda a colisão com esse planetóide que, em muito, determina a época das monções, bem como a existência, nos rios, dos períodos de cheia e consequente desenvolvimento das planícies fluviais aluviais, que foram absolutamente essenciais na génese das primeiras civilizações. Em síntese, foi devido à colisão de Teia com a Terra que temos o mundo que conhecemos, esse mundo que, num processo que demorou cerca de 4,5 mil milhões de anos, acabou por nos gerar a nós próprios.

II.2.2. A formação dos continentes

A Terra, como planeta orbitando a estrela central a uma distância integrada na zona que normalmente é considerada como propícia ao desenvolvimento da vida, onde co-existe água nos estados gasoso, líquido e sólido, teve uma evolução semelhante à dos outros corpos planetários, embora a proximidade do Sol lhe tenha conferido aspectos de certa forma diferenciadores. Inicialmente, a superfície terrestre era coberta por rochas em estado de fusão, que constituíam um oceano magmático global. Já existia, então, bastante água, cuja presença é contemporânea da formação da Terra, pois que os corpos que, por acreção, formaram o planeta, integravam quantidade significativa deste composto, o qual aqui continuou a chegar nos tempos que se seguiram, incluída nos materiais que intensamente bombardeavam o planeta. Porém, devido às condições de temperatura então existentes, qualquer água líquida que, por alguma razão, surgisse à superfície, era de imediato libertada sob forma de vapor para a atmosfera, ou decomposta nos seus radicais iónicos e integrada na massa magmática.

Foi preciso que a Terra evoluísse e se começasse a diferenciar em núcleo e manto, e que fosse progressivamente arrefecendo, para que se criassem condições que permitissem que o magma superficial começasse a solidificar, criando a primeira crosta que existiu no nosso planeta. Esses primeiros continentes formaram-se numa altura em que o planeta estava ainda muito quente e era, como se referiu, intensamente atingido pela queda muito frequente de asteróides e meteoros, cuja energia libertada tendia a reverter ou amortecia a tendência de arrefecimento da Terra. É tomado como certo que muitos dos blocos rochosos que então se constituíram, voltaram a ser fundidos perante o calor libertado por um grande impacto ocorrido na área em que se tinham formado.

Quando, no final da fase de intensa acreção, há pouco mais de 4 mil milhões de anos, ou seja, quando a frequência de material extraterrestre que colidia com a Terra começou a diminuir, a temperatura superficial do planeta começou a baixar, criando-se novas condições físico-químicas, em obediência às leis da física, que começaram a possibilitar a existência de água líquida. Com o tempo, a superfície planetária foi arrefecendo, e a superfície do oceano magmático foi progressivamente solidificando em extensões cada vez maiores. É duvidoso

que alguma porção da crosta original tenha subsistido até aos nossos dias. Além do que acima foi aludido, a movimentação das placas litosféricas provocou toda uma série de processos, como a subducção[1] e o vulcanismo, que fizeram com que muitas dessas rochas fossem submetidas a grandes pressões e temperaturas, modificando-as, ou, por outras palavras, alterando-as através de metamorfismo[2] ou, mesmo, anatexia[3]. Porém, por vezes, as condições a que essa rocha é submetida não são suficientes para modificar todos os minerais, subsistindo alguns mais resistentes, como é o caso do zircão ($ZrSiO_4$), que tem grande dureza (7,5 na Escala de Mohs, superior à do quartzo), elevado ponto de fusão (da ordem de 2 500ºC) e forte estabilidade química. Nestes casos, o fluido resultante da fusão da rocha original envolve esses que não foram fundidos, acabando por os preservar como inclusões na nova rocha que se formará quando a pressão e a temperatura diminuírem, constituindo o que se designa por xenocristais[4].

É através do exame destes xenocristais de zircão (normalmente com menos de um milímetro), existentes nas rochas que constituem cratões[5], isto é, em áreas constituídas por crosta continental muito antiga, que sabemos que a crosta terrestre primitiva se formou há mais de mil milhões de anos. Por exemplo, no Nordeste do Canadá, no gnaisse (rocha metamórfica afim do granito) de Acasta, do Cratão dos Escravos, cuja idade é de cerca de 3,9 mil milhões de anos, existem xenocristais de zircão com 4,0 ou, mesmo 4,2 mil milhões de anos. Mas há casos que indiciam idades ainda mais antigas.

Na Austrália Ocidental, no cratão de Yilgarn, existem os quartzitos (rocha metamórfica derivada de arenitos ricos em quartzo) de Jack Hills, cuja idade é superior a 3,6 mil milhões de anos, mas em que foram datados zircões com cerca de 4,4 mil milhões de anos. A existência destes zircões implica que, bastante antes de há 4 mil milhões de anos, se teria formado crosta de composição basáltica (que hoje designamos por crosta oceânica), e que teriam ocorrido processos que conduziram a nova fusão de parte dessa crosta primitiva, acompanhada por metamorfismo e fusão de grandes quantidades de materiais, que gradualmente foram formando magmas de composição similar à dos granitos, talvez há mais de 4,4 mil milhões de anos. Estes, ao arrefecerem e solidificarem, produziram rochas menos densas que os basaltos (ou seja, crosta continental, cuja densidade média é 2,7 g/cm^3), que, portanto, "flutuavam" no oceano magmático (que podemos considerar ter características semelhantes às do manto superior, com densidade 3,3 g/cm^3) ou na crosta constituída pela sua consolidação à superfície, que, devido à diferenciação, teria densidade por volta de 3,0 g/cm^3. Os zircões aludidos são, portanto, testemunhos desta primeira crosta continental do tipo

---

[1] Do latim *sub* = prefixo que transmite a ideia de "sob", "por baixo" + *ducere*, , que significa "conduzir", "levar", "guiar". Processo geológico que ocorre em limites convergentes de placas litosféricas, em que uma das placa se afunda sob a outra, deslocando-se para dentro do manto superior, onde acaba por ser fundida.

[2] Do grego μετά [meta] = "mudança" + μορφή [morfo] = "forma", significando portanto mudança de forma. É o conjunto de processos que actuam no interior da crosta terrestre, onde existem temperaturas e pressões elevadas, que produzem transformações, quer na textura, quer na composição das rochas. O metamorfismo tem lugar em meio essencialmente sólido, isto é, sem fusão generalizada dos minerais.

[3] Do grego ἀνα- [ana-] = prefixo que significa "de novo, "de volta" + Τήξις [teksis] = "fusão". Termo introduzido, em 1907, pelo geólogo finlandês Jakob Johannes Sederholm (1863-1934). É a fusão diferencial das rochas submetidas, no interior da crosta, a grandes pressões e temperaturas, do que resulta um magma que posteriormente é recristalizado. É, de certa forma, uma fase extrema de metamorfismo.

[4] Do grego ξένος [xénos] = "estranho", "estrangeiro" + κρύσταλλος [krústallos] = "gelo transparente", significando cristal (mineral) estranho à rocha envolvente.

[5] Do grego κράτος [kratos] = "força", "poder". O termo que designa as partes mais antigas, estáveis e resistentes da litosfera continental, localizadas, em geral, nas zonas centrais dos continentes.

granitóide, formada há mais de 4,4 mil milhões de anos, que foi erodida, sendo os minerais mais resistentes posteriormente integrados em rochas sedimentares, que depois viriam a transformar-se nos quartzitos de Jack Hills.

Porém, é possível que parte da própria crosta primitiva tenha sido, de algum modo, preservada até aos nossos dias. Com efeito, no complexo de Inuksuaq, localizado no cinturão de rochas verdes (*greenstone belt*) da região de Nuvvuagittuq, no litoral oriental da Baía de Hudson, a Norte do Québec, afloram rochas que tiveram origem vulcânica, com idade superior a 3,6 mil milhões de anos, que posteriormente foram afectadas pela colisão de placas tectónicas, tendo sido convertidas, por metamorfismo, em anfibolitos[1]. Em 2008, um grupo de investigadores canadianos e norte-americanos, liderados por Jonathan O'Neil, dataram uma amostra dessas rochas, tendo obtido uma idade de 4,28 mil milhões de anos. Embora este resultado seja objecto de contestação por alguns investigadores, a corresponder à realidade, aí estaria preservado um remanescente da presumível crosta original da Terra.

Embora o assunto venha a ser mais aprofundado na Parte III, é aqui referido pois que está intrinsecamente ligado à evolução da Terra como corpo astronómico, profundamente dependente dos objectos celestes que com ela colidiam e a iam modificando. Assim, com base nos dados existentes, podemos deduzir que há mais de 4 mil milhões de anos, talvez mesmo há mais de 4,4 mil milhões de anos, o planeta deixou de ser um corpo incandescente, coberto por um oceano magmático, começando a parte interna da Terra, em estado de fusão, a ficar isolada da atmosfera por uma camada de rochas consolidadas do tipo basáltico, consequentemente mais frias. Estas foram transformadas posteriormente em litologias granitóides e sedimentares, começando a dar origem à crosta continental. Foi necessário que decorressem muitos milhões de anos para que a actuação dos processos geológicos, fosse construindo, a pouco e pouco, cada vez mais crosta continental (do tipo granítico), aumentando progressivamente essas áreas até ocuparem actualmente mais de um terço da superfície terrestre (referimo-nos a crosta continental e não a continentes emersos, cuja área actual corresponde apenas a uns 29% da superfície do planeta). Esse aumento progressivo da crosta continental, desde os primeiros tempos da Terra até aos nossos dias, está expresso, em termos volumétricos, na figura II.2.

Embora o assunto venha a ser mais aprofundado na Parte III, é aqui referido pois que está intrinsecamente ligado à evolução da Terra como corpo astronómico, profundamente dependente dos objectos celestes que com ela colidiam e a iam modificando. Assim, com base nos dados existentes, podemos deduzir que há mais de 4 mil milhões de anos, talvez mesmo há mais de 4,4 mil milhões de anos, o planeta deixou de ser um corpo incandescente, coberto por um oceano magmático, começando a parte interna da Terra, em estado de fusão, a ficar isolada da atmosfera por uma camada de rochas consolidadas, consequentemente mais frias.

Sem a permanente transmissão de calor proveniente da superfície fundida da Terra (o oceano magmático), a atmosfera começou a arrefecer. Rapidamente, o seu estado térmico global começou a ficar cada vez mais dependente da radiação solar e, portanto, mais isenta do aquecimento que lhe chegava do interior da Terra.

---

[1] Anfibolito é uma rocha constituída principalmente por minerais do grupo das anfíbolas, sem ou com apenas vestígios de quartzo. O neologismo anfíbola foi introduzido em 1797 (e mais tarde no seu famoso "Traité de minéralogie", de 1801) pelo mineralogista francês René Just Haüy (1743-1822), considerado como o pai da cristalografia moderna, a partir do grego αμφιβολος [amfibolos] = "ambíguo", "duvidoso", em alusão à grande variedade de composição e aparência dos minerais deste grupo, tendo aí incluído os minerais tremolite, actinolite e a horneblendas. Posteriormente, a designação foi expandida a todo o grupo dos silicatos de dupla cadeia. Assim, o nome da rocha anfibolito, deriva de anfíbola + sufixo grego λίθος [líthos] = "pedra".
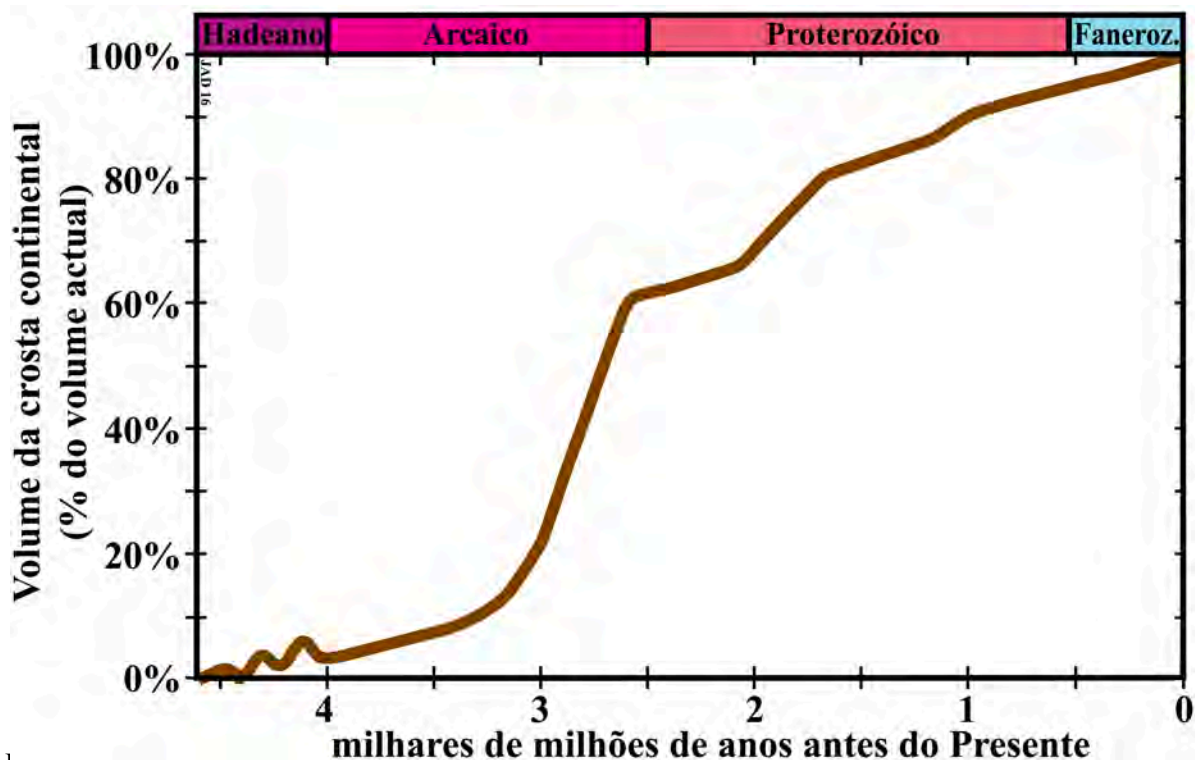
Figura II.2 – Presumível aumento de volume da crosta continental ao longo da história da Terra.

Nos processos de solidificação da superfície, na sequência de reacções redox (isto é, de redução-oxidação), muitos dos radicais da água (hidroxilo: OH^-) que estavam presentes no magma que estava a ser convertido em rocha dura começaram a ser libertados para a atmosfera, aumentando a quantidade de vapor de água nela existente. É de referir, também, que existindo uma crosta sólida, havia intenso vulcanismo, o qual expelia também para a atmosfera grandes quantidades de vapor de água. Assim, como resultado de todos estes processos, a quantidade de água existente na Terra foi progressivamente aumentando. Há uns 4 mil milhões de anos o vapor de água correspondia, possivelmente, a cerca de 70% da composição da atmosfera (refira-se, como termo de comparação que, na atmosfera actual, a água corresponde, *grosso modo*, a bastante menos de 1%).

Com a diminuição da temperatura superficial do planeta e, portanto, também da atmosfera, criaram-se novas condições físico-químicas, em obediência às leis da física, que começaram a possibilitar a existência de água líquida. Não se sabe bem quando, mas, possivelmente, há uns 4 mil milhões de anos ou mais, atingiram-se condições de temperatura e de pressão atmosférica que propiciaram a transformação abundante de vapor de água atmosférico em água líquida. As nuvens começaram, então, a desfazer-se, provocando chuva extremamente abundante, acompanhada por temporais de proporções inimagináveis. Inicialmente, a chuva caía em rochas ainda muito quentes, pelo que a água se evaporava de imediato. Porém, tal contribuía para o arrefecimento das rochas, pelo que, a certa altura, a água da chuva teve condições para permanecer no estado líquido, escorrendo para as zonas deprimidas da superfície da Terra. Formaram-se, assim, os primeiros rios que fluíam para os oceanos originais. Tendo em consideração a grande quantidade de vapor de água que existia na atmosfera, foi um processo extremamente rápido. Segundo cálculos efectuados, em 1993, por Yutaka Abe, da Universidade de Tóquio, a pluviosidade que então ocorreu seria da ordem de 7 000 mm/ano, ou seja, dez vezes maior do que a registada actualmente nas latitudes tropicais, o que teria proporcionado a formação dos oceanos em menos de um milhar de anos, os quais

teriam acabado por cobrir praticamente toda a superfície terrestre. Como é evidente, foi a partir dessa altura que o oceano se institui, de certa forma, como grande regulador climático.

A transferência de água da atmosfera para a hidrosfera provocou modificação radical das condições ambientais, nomeadamente das características climáticas. Com a retirada de água da atmosfera, a percentagem relativa de CO_2 e de N_2, bem como de outros gases, aumentou muito. Teoricamente, a percentagem de CO_2 poderia chegar a constituir cerca de 90% dos gazes atmosféricos. Porém, como o CO_2 é solúvel em água, este começou, também, a ser rapidamente retirado da atmosfera, ficando dissolvido na água oceânica. Porém, o carbono dissolvido reage com os iões de cálcio ($Ca^{2+)}$ em solução (proveniente da alteração das rochas cristalinas), formando calcite e aragonite (ambas com a composição CaCO3). Segundo as estimativas efectuadas, em 2008, pelo geoquímico norte-americano Abraham Lerman, da Northwestern University, a remoção de quantidades substanciais de CO_2 da atmosfera primordial teria gerado, nalgumas centenas de milhões de anos, por precipitação inorgânica, uma massa de $CaCO_3$ comparável à quantidade total que actualmente existe em todos os sedimentos da Terra.

Portanto, há uns 4 mil milhões de anos, ou provavelmente mais, o nosso planeta ficou dotado de um oceano global de água líquida. Passou a ser o que, com frequência, se designa por Planeta Azul ou Planeta Água. Embora esse oceano fosse profundamente diferente do que hoje conhecemos, a sua constituição marca o nascimento das interacções dos três componentes básicos do funcionamento climático da Terra: a atmosfera, os continentes e o oceano. São principalmente essas interacções que redistribuem pela Terra a energia recebida do Sol, e que continuaram a funcionar ininterruptamente, desde essa altura, até aos nossos dias.

II.3. Passado, presente e futuro do Sol

II.3.1. De anã amarela a gigante vermelha e a anã branca

Como é sabido, o Sol é a estrela central do sistema solar, e dele estamos totalmente dependentes. É a energia radiante solar que chega à Terra que constitui o forçamento básico do clima. A transcendente importância do Sol em tudo o que a nós se refere, desde os processos de especiação que conduziram ao aparecimento do *Homo sapiens*, às diversificadas acções do nosso quotidiano, justificam que lhe dediquemos um pouco mais de espaço.

O Sol é uma das mais de cem mil milhões de estrelas que constituem a nossa galáxia, a Via Láctea[1]. Dista cerca de 25 000 anos luz do centro da galáxia, tendo movimento de translação em torno do ponto central, demorando aproximadamente 250 milhões de anos a completar uma órbita. É uma estrela anã amarela, ou, na terminologia astronómica, uma estrela da sequência principal de classe G (G2V). Com os seus cerca de 4,6 mil milhões de anos, encontra-se actualmente na meia idade.

Aproximadamente 99,86% da massa total do sistema solar estão concentradas no Sol. Cerca de três quartos da sua massa correspondem a hidrogénio, sendo o outro quarto constituído, essencialmente, por hélio. Outros elementos mais pesados, estão, também, aí presentes, embora em quantidades muito pequenas, de onde se destaca o oxigénio (menos de 0,8%) e o carbono (menos de 0,3%). Elementos como o ferro, o néon, o azoto, a sílica, o magnésio e o enxofre ocorrem em percentagens diminutas, inferiores a 0,2%.

O núcleo do Sol é um imenso reactor de fusão termonuclear, em que o hidrogénio é convertido em hélio, libertando energia. Estima-se que, a cada segundo, cerca de 700 milhões de toneladas de hidrogénio (que, como se sabe, tem um protão) sejam transformados em hélio (com dois protões), sendo, neste processo, 0,7% da matéria convertida em energia. Portanto, o combustível do Sol é o hidrogénio, e à medida que o vai consumindo, deixa o hélio como “resíduo”. Como, neste processo, alguma da massa é convertida em energia, tal significa que o Sol vai perdendo massa.

A famosa equação de Einstein $E = mc^2$ permite-nos estimar qual é essa perda de massa. Resolvendo a equação em ordem a m (massa), ficamos com $m = E/c^2$, em que E é a energia e c é a velocidade da luz. Considerando que a luminosidade absoluta (E, energia) é de $3{,}86 \times 10^{33}$ erg/s, e que a velocidade da luz é $2{,}99 \times 10^{10}$ cm/s, ficamos com $m = 3.86\text{x}10^{33}/(2.99\text{x}10^{10})^2$ e, portanto, $m = 4{,}289 \times 10^{12}$ g/s. Assim, conclui-se que, a cada segundo que passa, o Sol converte cerca de 4,3 milhões de toneladas em energia. Neste aspecto, nada de preocupante para a vida na Terra, pois que o hidrogénio utilizável existente no Sol demorará a ser consumido, ainda, uns 5 mil milhões de anos, razão porque começámos por dizer que a nossa estrela se encontra na meia idade. Por outro lado, a perda de massa devido a conversão em energia é, na realidade, ínfima: estima-se que, no final da sua vida, o Sol terá perdido 0,034% da sua massa actual.

Por outro lado, devemos ter em consideração que, no nosso sistema solar, existe intensa actividade. Se o Sol está a perder, paulatinamente, uma pequeníssima parte da sua massa, que é convertida em energia, em contrapartida é o centro de atracção de todos os objectos existentes no sistema, muitos dos quais acabam por nele cair (figura II.3). A colisão entre asteróides é relativamente frequente, sendo nessas colisões produzida grande quantidade de

[1] Do grego γαλαξίας [galaxías], derivado de γάλα [gala] = “leite” + κύκλος [kýklos] = “círculo”, correspondente, portanto, a “círculo leitoso”, através do latim, “*via láctea*”. O nome advém da banda com aspecto leitoso que a nossa galáxia apresenta quando observada da Terra a olho nu.

partículas, com dimensões variadas, que mais tarde ou mais cedo, atraídas pelo grande campo gravitacional do Sol, nele acabam por cair. O mesmo acontece com os cometas, muitos oriundos do espaço exterior, que ao entrarem no Sistema Solar interior libertam também grande quantidade de partículas que acabam por ter o mesmo destino.
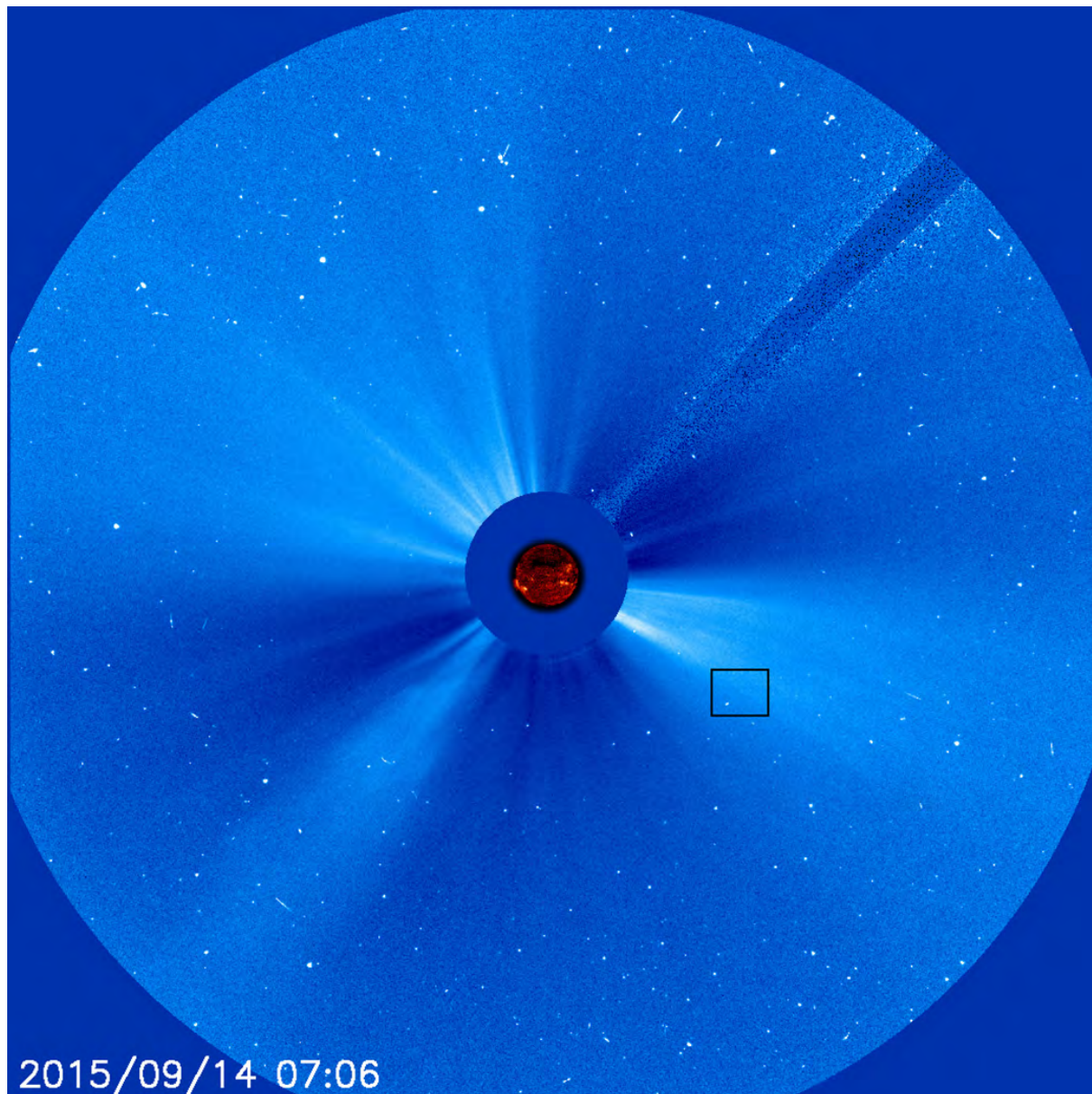
Figura II.3 – Coronografia, ou seja, imagem em que o brilho do Sol foi bloqueado por forma a tornar visíveis as estruturas em seu redor, obtida em 13 de Setembro de 2015, em que está realçado com um pequeno rectângulo o cometa então descoberto. Cada um dos pontos brancos é um objecto com dimensões suficientemente grandes para ficar registado na imagem, embora a maior parte dos que estão mais próximos do Sol não seja visível devido ao brilho da estrela. A sensação de que a densidade de objectos aumenta com a distância ao Sol é falsa: tal acontece porque o brilho do Sol diminui progressivamente, tornando-os mais visíveis.

As imagens que têm sido obtidas pela sonda SOHO[1] (*Solar & Heliospheric Observatory*) são, neste aspecto, reveladoras. Até ao lançamento desta sonda, conheciam-se menos de mil cometas. A SOHO permitiu identificar muitos outros, tendo, no dia 13 de Setembro de 2015, sido detectado o cometa número três mil (figura II.3). É possível concluir que, a cada segundo, caem no Sol várias toneladas de materiais com dimensões diversas, que vão desde poeiras muitos finas a, por vezes, objectos de grandes dimensões.

Além da gravidade que prende a Terra (e todos os outros corpos do sistema) ao Sol, fazendo-a orbitar em seu torno, é dele que recebemos toda a energia, quer a que incide no planeta sob forma de radiação, quer a que por esta é induzida de várias formas. Recordemo-nos que as correntes superficiais marinhas, os ventos e praticamente todos os outros fenómenos climáticos são, na essência, formas de distribuir a energia que a Terra recebe do Sol. Recordemo-nos que o crescimento da vegetação e o aumento demográfico das espécies animais está dependente dessa energia, e que, de forma mais ou menos transitória, constituem formas de armazenar essa energia. Recordemo-nos que os hidrocarbonetos de que a sociedade está dependente, principalmente o carvão, o petróleo e o gás natural, são, em última análise, reservatórios de energia solar que o planeta recebeu no passado.

Como se referiu acima, o Sol é uma imensa central termonuclear e foi a pequena fracção de energia, por ele emitida, que é recebida pela Terra, que propiciou o progressivo desenvolvimento da vida. Nós, *Homo sapiens sapiens*, devemos a existência a essa energia. E é, como acima se justificou, imensa a quantidade de energia que o Sol liberta a cada momento. Com tanta energia em jogo, é evidente que a temperatura do Sol está muito para lá do que conseguimos imaginar tendo como base os referenciais do quotidiano. A temperatura da parte visível do Sol está a cerca de 5 500ºC. Refira-se, como termos comparativos, que tal temperatura é muito superior à dos magmas terrestres, que, em geral, variam entre 700ºC e 1 300ºC, e mesmo à do manto na zona junto ao núcleo, que está a uns 4 000ºC. É comparável à no núcleo da Terra, cujas temperaturas são dessa ordem. Porém, é no núcleo do Sol que se processam as reacções termonucleares. Aí, as temperaturas atingem inimagináveis 15 000 000ºC ...

II.3.2. Evolução do Sol desde jovem a maduro e a velho

II.3.2.1. Diminuição da rotação do Sol

O Sol constituiu-se há cerca de 4,6 mil milhões de anos a partir de uma vasta nuvem de gás e poeiras, a nebulosa solar, que girava lentamente, e que, gradualmente, se achatou. Como já foi referido, de acordo com a teoria elaborada, em 2010, pelo astrónomo norte-americano Jonathan P. Williams, a explosão de uma estrela que deu origem a uma supernova, nas imediações da nébula solar aludida, gerou ondas de choque que, ao atingirem essa nuvem de gases e partículas, geraram regiões super-densas, cuja gravidade fez com que colapsassem e começassem a girar sobre si próprias, iniciando-se, assim, o processo de formação do sistema solar, com a sua estrela central, os planetas e todos os outros corpos que nele se encontram integrados. A grande quantidade de material aglutinado no meio da nébula solar exerceu uma atracção gravítica maior, o que suscitou a junção de maiores quantidades de matéria, formando-se uma protoestrela, onde, não obstante o hidrogénio dominar largamente a sua

[1] A SOHO (*Solar & Heliospheric Observatory*), resultado de um esforço cooperativo entre a ESA (*European Space Agency*) e a NASA (*North American Space Agency*), foi lançada a 2 de Dezembro de 1995, com o objectivo de estudar a estrutura interna do Sol, a sua extensa atmosfera e a origem do vento solar, estando previsto que operasse até 1998. Porém, perante os sucessos obtidos, a ESA e a NASA têm decidido sucessivos prolongamentos da missão.

composição, ainda não ocorria fusão nuclear. O Sol teria permanecido neste estado de protoestrela durante cerca de cem mil anos. Porém, com a constante junção de mais matéria, atraída pela gravidade cada vez maior desse corpo central, a certa altura a massa passou a ser tão grande que as pressões e temperaturas existentes no núcleo atingiram valores críticos (da ordem de 15 milhões de graus centígrados), o que propiciou o início das reacções termonucleares, isto é, da fusão do hidrogénio em hélio. Neste momento, nasceu uma nova estrela, o nosso Sol.

Os processos que ocorreram nos primeiros momentos da existência do Sol como estrela são ainda mal compreendidos, e os modelos existentes dão resultados frequentemente contraditórios. Segundo alguns modelos, logo no início, o Sol seria bastante mais brilhante do que actualmente, perdendo essa grande luminosidade muito rapidamente. Todavia, outros modelos fornecem indicações contrárias: o Sol seria fraco, mas rapidamente teria aumentado de luminosidade. No entanto, a generalidade dos modelos é convergente na indicação de que depressa, talvez há uns 4,5 mil milhões de anos, a nossa estela teria atingido a estabilidade, comportando-se, desde essa altura, de forma relativamente monótona.

O Sol recém-nascido, passados os turbulentos momentos iniciais, tinha características um pouco diferentes das que hoje conhecemos. O seu movimento de rotação era bastante mais rápido, rodando sobre o seu próprio eixo a uma velocidade mais de dez vezes superior à que tem actualmente, em que se completa uma rotação mais ou menos a cada 24,7 dias. Para percebermos melhor este assunto temos que ter em consideração que o Sol não é um corpo sólido. Lembremo-nos que é essencialmente constituído por hidrogénio. É uma gigante bola de gás e plasma[1]. Tal significa que, na zona equatorial solar, mais afastada do eixo de rotação, a velocidade linear do plasma gasoso é mais elevada do que nas zonas polares, cuja distância ao eixo é quase nula. Portanto, existe no Sol, tal como na Terra e em todos os corpos esféricos sujeitos a movimento de rotação, um diferencial de velocidade linear entre o equador e as zonas polares. Actualmente, no equador solar, o período de rotação é de 24,47 dias, enquanto junto aos pólos é de quase 38 dias[2].

Por outro lado, as diferentes partes constituintes do Sol rodam a velocidades diferentes. No interior (núcleo e zona de radiação), onde a pressão e temperaturas são extremamente elevadas, a rotação processa-se mais como a de um corpo sólido, em contraste com as camadas mais externas, nomeadamente a zona convectiva (caracterizada por movimentos em que o material aquecido sobe e, arrefecendo, torna a descer, formando células de convexão) e a fotosfera, que têm comportamento fluido. Os astrónomos designam esta zona de transição

---

[1] Do grego πλάσμα [plásma] = "criação", "alguma coisa que foi criada". É um dos quatro estados fundamentais da matéria, sendo os outros o sólido, o líquido e o gasoso. De forma simples, pode dizer-se que o aquecimento de um gás provoca a dissociação das suas ligações moleculares, convertendo as moléculas nos seus átomos constituintes; a continuação do aquecimento provoca a ionização (ganho ou perda de electrões) desses átomos, convertendo-o num plasma constituído por partículas carregadas, ou, numa linguagem mais prosaica, numa sopa de partículas electricamente carregadas.

[2] Referimo-nos ao chamado período de rotação sideral, ou seja, o tempo que demora um ponto no Sol a dar a volta de 360º, até atingir a mesma posição relativamente a estrelas consideradas fixas, o que é diferente do período de rotação sinódico, isto é, o tempo o que um ponto no Sol observado da Terra demora a atingir a mesma posição em relação à Terra. No equador solar o período de rotação sinódico é de 26,24 dias, pois que o ponto considerado, após completar a rotação sideral, tem de se deslocar um pouco mais porque a Terra, entretanto, já deslocou no seu movimento de translação.

por "tacoclina"[1], a qual se localiza a uma distância do centro mais ou menos igual a um terço do raio do Sol. De forma simplista pode dizer-se que, como a velocidade de rotação varia muito rapidamente na tacoclina, gera-se forte atrito que faz diminuir a velocidade.

Outro factor que provoca diminuição da velocidade de rotação do Sol é o chamado "vento solar" (fluxo de partículas carregadas que é libertado, em todas as direcções, pela camada superior da atmosfera solar, a corona, composto principalmente por electrões, protões e partículas alfa). A actividade magnética na superfície do Sol interage com as partículas carregadas electricamente, fazendo-as mover-se mais rapidamente, o que equivale a dizer que aquece a atmosfera e, por consequência, as camadas exteriores da atmosfera solar estão continuamente a expandir-se pelo espaço interplanetário. As partículas que constituem o vento solar, como se disse carregadas electricamente, interagem com o campo magnético do Sol que se estende para lá da órbita de Plutão. De forma simplificada, pode dizer-se que essas partículas tendem a afastar-se do Sol mais ou menos em linha recta, mas o campo magnético tende a fazer com que elas se movimentem noutra direcção, segundo as suas linhas de força, que rodeiam o Sol. Tal provoca uma espécie de atrito que contribui, também, para diminuição da velocidade de rotação do Sol. Se tivermos em consideração que o vento solar emitido pelo Sol jovem era duas ou três vezes mais intenso do que o actual, e que o campo magnético (função da velocidade de rotação) era bastante mais forte, esse efeito no amortecimento da rotação solar seria, na altura, bastante maior.

Vários outros factores intervêm na gradual diminuição da velocidade de rotação do Sol, entre os quais o atrito provocado pelos corpos planetário que o rodeiam, o que, designadamente, provoca marés terrestres e solares. Além de contribuir para o amortecimento da rotação do Sol, tal provoca, também, afastamento da Terra (e dos outros planetas) da estrela central do nosso sistema. Devido a este efeito, a Terra vai-se afastando progressivamente do Sol, qualquer coisa como um micrómetro (um milionésimo de metro), a cada ano que passa. Porém, parece não ser curial aprofundarmos aqui o assunto, nem explanarmos sobre outras causas do amortecimento da rotação do Sol.

II.3.2.2. Aumento da luminosidade e do diâmetro do disco solar

Quando o Sol era jovem, o disco solar era um pouco mais pequeno, cerca de 90% do que o que actualmente podemos observar, e a sua luminosidade (ou, de forma mais prosaica, o brilho) era um pouco mais ténue, talvez uns 70% da que tem agora (figura II.4). Como a luminosidade é um indicador da energia emitida pelo Sol, tal significa que este libertava menos calor, e que, portanto, a radiação solar recebida pela Terra era menor. Desde essa altura até aos nossos dias, a luminosidade do Sol tem vindo a aumentar de forma consistente, o mesmo acontecendo com o seu diâmetro. O mesmo se verificará no futuro: teremos um Sol cada vez maior e mais brilhante.

Para compreendermos a razão deste progressivo aumento de luminosidade, temos que ter em consideração os processos que causam essa luminosidade. No início da juventude do Sol (aquilo que os astrofísicos designam por idade zero da sequência principal ou ZAMS, sigla de *zero-age main sequence*), há uns 4,57 mil milhões de anos, a estrela era essencialmente constituída por hidrogénio, ou seja, pelo elemento menos denso da tabela periódica, com

[1] Do grego ταχυών [tachyon] = "rapidez", "velocidade" + κλίνης [klínis] = "cama", "camada", com o significado de camada em que há mudança de velocidade. O termo foi pela primeira vez utilizado em 1992 num artigo de E. A. Spiegel e J.-P. Zahn.

número atómico 1 (isto é, com um protão) e massa atómica 1,00794 *u*[1], que se encontrava sob forma de plasma. Como já se referiu, a fusão nuclear que ocorre no núcleo do Sol, funde hidrogénio em hélio, libertando energia. Neste processo, quatro protões do hidrogénio são aglutinados num núcleo de hélio, com número atómico 2 (portanto, com dois protões) e massa atómica 4,002602 *u* (correspondente a dois protões e dois neutrões), portanto, mais pesado. Por essa razão, à medida que o tempo vai passando e mais hidrogénio vai sendo convertido em hélio, a densidade do núcleo solar vai aumentando e, consequentemente, também a temperatura e a pressão. Pode dizer-se que existe como que uma luta entre os processos de fusão, que acabam por exercer uma pressão para o exterior, e a gravidade, que tende a comprimir a matéria na parte central.
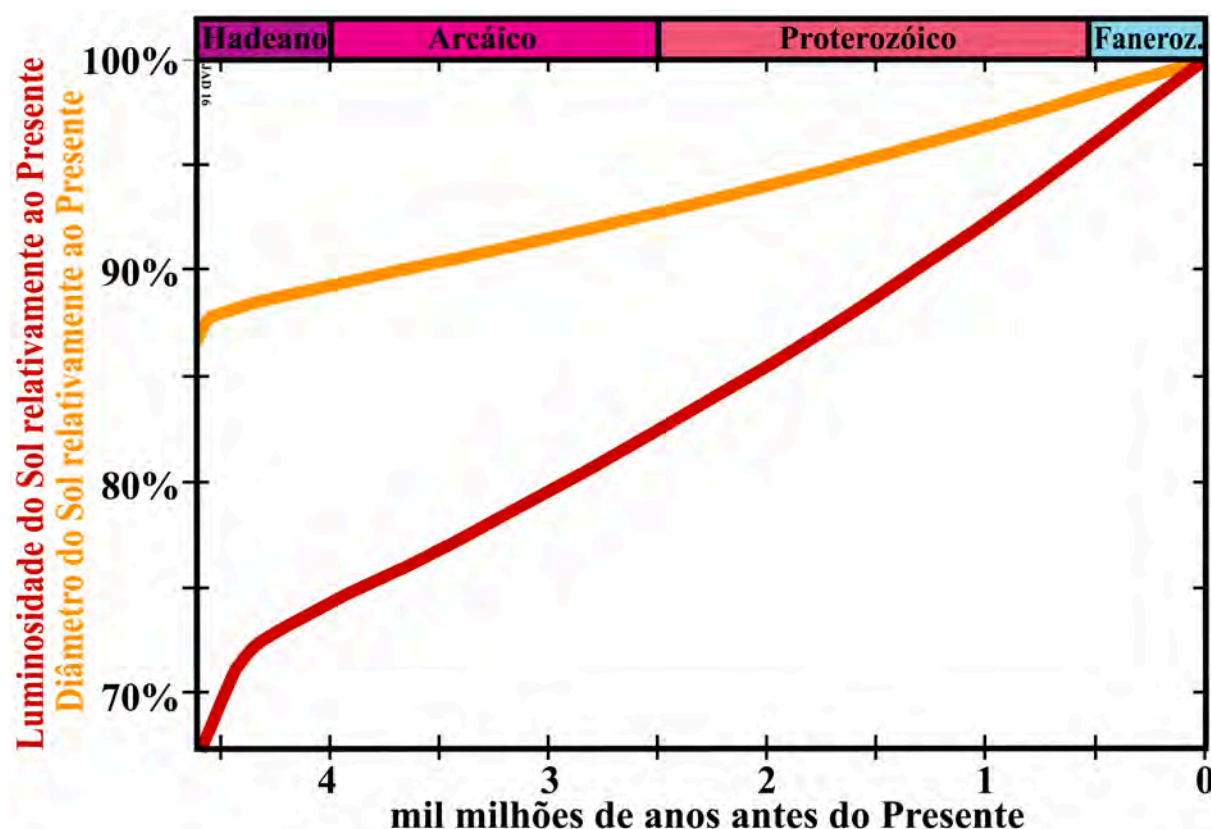
Figura II.4 – Presumível aumento da luminosidade e do diâmetro do Sol desde a sua formação até aos tempos actuais.

Em termos simplistas, como se referiu, como o hélio é mais pesado do que o hidrogénio, aquele tende a acumular-se no centro, aumentando, portanto, a densidade do núcleo interno. Como a concentração de hidrogénio diminui devido à acumulação de hélio, a probabilidade de ocorrência de reacções de fusão (em que só intervém o hidrogénio, pois que a fusão do hélio carece de temperaturas bastante mais altas) diminui também. É como se a força da gravidade começasse a levar a melhor sobre a pressão para o exterior exercida pelas reacções nucleares. Mas essa compressão provoca também aumento da pressão e da temperatura na área envolvente, criando condições para que, na parte envolvente do núcleo onde o hélio se

[1] Unidade de massa atómica unificada, simbolizada por *u*. É definida como um doze avos da massa de um átomo neutro de carbono. Como o número atómico do carbono é 6 (número de protões), mas o núcleo tem, também, 6 neutrões, a quantidade de nucleões (protões + neutrões) é 12. Assim, a unidade de massa atómica unificada corresponde, *grosso modo*, à massa de um nucleão, e tem o valor de $1.660539040 \times 10^{-24}$ g.

acumulou, passem também a ocorrer reacções de fusão do hidrogénio, o que exerce pressão no sentido do exterior. Assim, se na parte central a fusão diminui, tal é mais do que compensado por um aumento da fusão na região em torno do centro, o que se traduz numa maior libertação de calor e, portanto, de radiação. Neste processo, para manter a estabilidade (equilíbrio hidrostático), as camadas exteriores do Sol são pressionadas para fora, do que resulta expansão da estrela, ou seja, aumento do diâmetro do disco solar (figura II.4).

Portanto, devido à evolução do Sol como anã amarela, a sua luminosidade tem vindo progressivamente a aumentar desde a sua mais tenra juventude, e assim vai continuar até ao final da sua existência, daqui a uns 4,5 mil milhões de anos, quando transitará para a fase de gigante vermelha. Consequentemente, o calor que a Terra recebe do Sol sob forma de energia radiante tem vindo a aumentar. Como o motor básico do clima da Terra é a energia radiante solar, ao analisarmos a evolução climática e ambiental durante os tempos geológicos, devemos ter sempre em consideração este factor.

II.3.2.3. A velhice do Sol

Daqui a uns 5 mil milhões de anos, o Sol terá já consumido todo o hidrogénio utilizável, restando apenas o hélio resultante de mais de 10 mil milhões de anos de fusão termonuclear. Não havendo condições para prosseguirem estas reacções termonucleares, o núcleo, devido à sua própria gravidade, contrair-se-á. Atingir-se-ão, devido a esta contracção, temperaturas que propiciam a fusão do hélio, que será convertido em carbono e oxigénio.

O Sol colapsado entrará, assim, numa nova fase. A estrela renascerá com novas características: transformar-se-á numa gigante vermelha. Os níveis exteriores da estrela começarão a expandir-se, tornando-se menos densos. Por consequência, o diâmetro da estrela aumentará muito, atingindo valores centenas de vezes maiores do que o do Sol actual, acabando por integrar os planetas mais próximos, Mercúrio e Vénus, ficando a Terra muito próxima desta grande estrela. Será o fim do nosso planeta e da vida que nele, então, existir.

Com base no estudo das outras estrelas, é possível prever que, num futuro muito distante, depois todo o hélio utilizável ter sido consumido, a estrela entrará novamente em colapso. As camadas exteriores serão ejectadas, formando uma "nebulosa planetária"[1]. Remanescerá o núcleo, em que já não há fusão termonuclear, mas que será muito denso, com massa semelhante à do Sol actual, mas com volume comparável ao da Terra. Será a fase final da vida da nossa estrela, convertida em anã branca, que inicialmente será muito quente, mas que, como nela já não se produz energia (pois não há condições para ocorrerem reacções termonucleares), irá arrefecendo à medida que vai emitindo radiação.

II.3.3. O paradoxo do Sol jovem e fraco

Como mais acima foi aludido, inicialmente a Terra era extremamente quente, correspondendo a sua superfície a um oceano magmático. Com a passagem do tempo verificou-se arrefecimento progressivo, atingindo-se condições para que a parte superficial do nosso

[1] Esta designação é equívoca, pois que nada tem a ver com planetas. Foram assim apelidadas pelo compositor e astrónomo alemão naturalizado inglês William Herschel (1738-1822), porque estes objectos astronómicos observados com os telescópios de baixa definição da altura, tinham aparência de grandes planetas, sendo de certa forma parecidos com Urano, que Herschel tinha descoberto em 1781. Porém, em 1790, Herschel descobriu uma nebulosa planetária com uma estrela central muito brilhante, ficando convencido de que este tipo de nebulosa correspondia a corpos astronómicos constituídos por gases ou poeiras associadas a uma estrela central.

planeta começasse a solidificar extensamente. Nessas novas condições, sem o calor permanentemente emanado do magma superficial, a atmosfera foi também sujeita a arrefecimento, o que permitiu que o vapor de água atmosférico começasse a liquidificar, formando gotas de água que foram progressivamente precipitando sob forma de chuva. Originou-se, assim, ao que parece de forma muito rápida, o oceano (de água líquida), o qual viria a cobrir quase toda a Terra. Como a crosta litosférica foi arrefecendo, o calor emanado pelo interior da Terra tornou-se, talvez há uns 4 mil milhões de anos, pouco importante para o balanço energético planetário, sendo a principal fonte de calor constituída pela energia radiante solar. Porém, como se referiu, na altura, o Sol era bastante mais fraco do que o actual.

Em 1972, os astrónomos norte-americanos Carl Sagan e George Mullen publicaram um pequeno artigo na revista *Science,* que viria a ter grande impacto na comunidade científica, em que formulavam o seguinte problema: nos tempos remotos da Terra o Sol era cerca de 30% mais fraco do que actualmente, o que faria com que a parte superficial do nosso planeta tivesse temperaturas fortemente negativas, muito abaixo da temperatura de congelação da água (Figura II.5) e, portanto, incompatíveis com o desenvolvimento da vida; porém, existem indícios de vida na Terra há, pelo menos, 3,8 mil milhões de anos; como temperaturas abaixo à da congelação da água não são compatíveis com o desenvolvimento da vida, é impossível que as temperaturas aludidas fossem fortemente negativas. A questão viria a gerar muitas discussões, que se prolongam até aos dias de hoje, tendo ficado registada na literatura científica como o "Paradoxo do Sol Jovem e Fraco". Os próprios autores avançaram, no artigo referido, com a solução: a atmosfera primitiva redutora da Terra continha gases de estufa suficientes que compensavam largamente a menor intensidade da energia radiante recebida do Sol mais fraco. Neste contexto, sugeriram que a atmosfera primitiva poderia estar bastante enriquecida em amónia [NH_3] e metano [CH4], poderosos gases de efeito de estufa.

Porém, rapidamente alguns investigadores manifestaram a impossibilidade da amónia poder ter um efeito significativo. Foi, entre outros, o caso de W. R. Kuhn e S. K. Atreya, da Universidade do Michigan que, em 1979, chamaram a atenção para o facto da amónia ser instável na atmosfera, sendo decomposta por fotólise[1] nos seus componentes básicos, isto é, em azoto e hidrogénio; na atmosfera pré biótica, a amónia seria irreversivelmente dissociada em menos de 40 anos. Portanto, o forte efeito de estufa causada por este composto só poderia ser relevante se existisse um fornecimento constante à atmosfera, presumivelmente por desgazeificação (do manto, através do vulcanismo). Porém, tal possibilidade foi rejeitada por muitos autores, dadas as enormes quantidades que seria preciso envolver no processo.

No mesmo ano de 1979, Tobias Owen e colegas chegaram à conclusão de que não é preciso recorrer à amónia para se ter um efeito de estufa suficiente forte que impedisse a existência global de temperaturas que provocassem congelamento generalizado da água: bastaria que houvesse quantidades suficientes de dióxido de carbono (CO_2). Embora seja um gás de estufa menos potente que a amónia, a sua libertação para a atmosfera em grandes quantidades é muito mais fácil de justificar, nomeadamente através do vulcanismo. A mesma postura foi expressa por vários outros cientistas, nomeadamente em vários artigos da equipa do geólogo James Fraser Kasting (1953- …), da Penn State University e colaborador da NASA na procura de planetas extra-solares, que concluíram que essa atmosfera primitiva deveria conter entre cem a mil vezes mais dióxido de carbono do que a atmosfera actual. Além das emissões vulcânicas, estes investigadores consideraram também a contribuição de outras fontes de CO_2,

[1] Fotólise, fotodissociação ou fotodecomposição é uma reacção química em que um composto se desagrega nos seus constituintes básicos por absorção de um fotão.

nomeadamente a oxidação fotoquímica do metano (CH_4) e do monóxido de carbono (CO). Com efeito, na altura, bactérias metanogénicas[1] devem ter libertado grandes quantidades de metano que, por si só, ou transformadas em dióxido de carbono, produziriam o efeito de estufa necessário para que a Terra não congelasse perante a menor radiação recebida de um Sol mais fraco (Figura II.5).
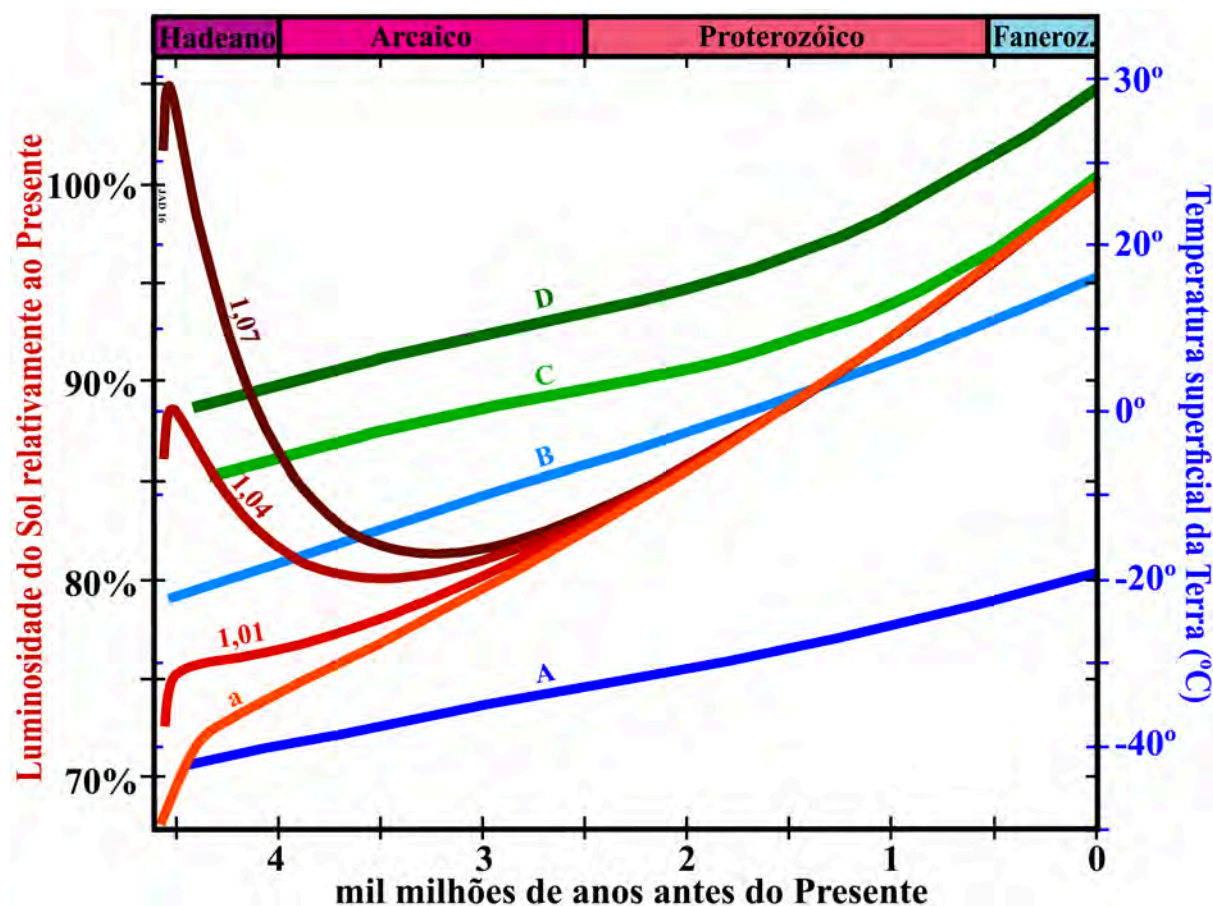
Figura II.5 – Variação da luminosidade do Sol com o tempo. A linha cor de laranja (a) representa a variação preconizada por um modelo clássico de evolução. As linhas vermelhas correspondem a modelos de evolução estrelar em que foi considerada uma massa inicial do Sol 1,01, 1,04 e 1,07 vezes maior da que é geralmente considerada. A linha azul (A) corresponde à evolução da temperatura média da superfície da Terra se não houvesse atmosfera, e a azul clara (B) se essa atmosfera fosse idêntica à actual. A linha verde claro (C) reproduz a evolução das temperaturas com 375 ppm de CO_2 e 1.7 ppm de CH_4 atmosféricos, enquanto a linha verde escuro (D) expressa como seria essa evolução se a atmosfera tivesse 900 ppm de CO_2 e 900 ppm de CH_4.

Até finais do século XX, a generalidade dos investigadores aceitava que a existência de temperaturas acima das da congelação da água no éon[2] Arcaico (entre há 4 e 2,5 mil milhões de anos), em que o Sol era 20% a 25% mais fraco do que o actual, se devia à composição da

[1] Bactérias metanogénicas são microorganismos que vivem em condições anóxicas e que produzem metano como subproduto do seu metabolismo: na presença de hidrogénio, reduzem o dióxido de carbono, transformando-o em metano. A reacção pode ser expressa da seguinte forma: $CO2 + 4 H2 \rightarrow CH4 + 2 H2O$. São comuns, entre outros, em zonas húmidas e nos tractos digestivos dos ruminante (onde provocam eructação, isto é, arrotos ricos em metano) e dos humanos (provocando flatulência).

[2] Do grego αἰών [aiṓn] = "idade", "período da existência", através do latim tardio *aeon*. É a maior subdivisão na escala de tempo geológico.

atmosfera dessa altura, com gases que induziam um forte efeito de estufa. As discussões giravam predominantemente em torno da composição dessa atmosfera, e das importâncias relativas do dióxido de carbono, do metano e do vapor de água. Apenas como exemplo, refere-se o artigo do citado James F. Kasting com a sua colega Janet L. Siefert, em que se considera que, para que as temperaturas superficiais estivessem acima das do congelamento da água, numa atmosfera constituída apenas por CO_2, sem CH_4, seria necessário que a concentração daquele fosse da ordem de 20 000 ppm[1], isto é, cerca de 50 vezes maiores do que as actuais (aproximadamente 400 ppm) e 7 vezes maiores da que se pode deduzir do registo geológico. Porém, os autores concluem que se 0,1% da atmosfera fosse constituída por metano (cerca de 1 000 ppm), as temperaturas superficiais positivas seriam atingidas com concentrações de dióxido de carbono muito menores, compatíveis com as que se deduzem do registo geológico. Como grandes contribuintes para essas grandes quantidades de metano, além das emissões vulcânicas, os autores sugerem a intervenção de bactérias metanogénicas, que possivelmente era o tipo de vida dominante até aparecerem os organismos fotossintéticos, as quais produzem metano como um subproduto metabólico em condições anóxicas (e, na altura, recordemos, o oxigénio era raro ou inexistente).

Como é normal no processo científico, o modelo acima sucintamente exposto foi, também, alvo de críticas e de novas propostas para resolução do paradoxo do Sol jovem e fraco. Entre essas, ressalta a do dinamarquês Minik T. Rosing (1957- …) e colegas, publicada em 2010. Estes investigadores consideram que a mineralogia dos sedimentos do Arcaico, particularmente a presença ubíqua de formações de ferro bandado[2], é inconsistente com concentrações muito altas de gases de estufa, e com as limitações metabólicas das bactérias metanogénicas. Propõem, em alternativa ou como factor contribuinte, que o albedo[3] da Terra seria, nessa altura, significativamente menor do que o actual. Tal seria devido, entre outras causas, às massas continentais (cujo albedo é da ordem de 30%, isto é, reflectem cerca de 30% da radiação que sobre elas incide) serem, então, muito mais pequenas, correspondendo a superfície terrestre quase na totalidade a oceanos (cujo albedo é da ordem de 5 a 10%), e à inexistência de núcleos de condensação induzidos biologicamente, que constituem actualmente um dos principais mecanismos de formação de nuvens (que são bastantes eficazes na reflexão da radiação solar). Com um albedo mais baixo, menos radiação seria reflectida para o espaço e, portanto, mais calor seria absorvido pela superfície terrestre, o que diminuía a necessidade de concentrações extremamente elevadas de gases de estufa na atmosfera para existirem condições ambientais acima do ponto de congelamento da água.

---

[1] ppm = partes por milhão

[2] As formações de ferro bandado são muito características dos terrenos mais antigos (alguns com, talvez , mais de 3,8 mil milhões de anos, como os de Isua, no Oeste da Groenlândia), que atingiram expressão máxima há uns 2,5 mil milhões de anos e quase desaparecem do registo geológico há aproximadamente 1,8 mil milhões de anos. Correspondem a depósitos sedimentares marinhos e são constituídos por bandas repetidas de óxidos de ferro (principalmente magnetite [Fe_3O_4] e hematite [Fe_2O_3]), em geral com espessura milimétrica a centimétrica, que alternam com bandas ricas em sílica e pobres em ferro (xistos e chertes), com espessura semelhante. Testemunham a fase em que a superfície da Terra (incluindo a atmosfera e o oceano) ainda não tinha praticamente oxigénio, ou este existia em muito pequenas quantidades. A origem destas rochas sedimentares resultantes de precipitação química não é ainda bem compreendida, mas aceita-se que os principais responsáveis pela sua formação foram microorganismos fotossintéticos que libertaram o oxigénio, que foi quase de imediato utilizado na oxidação do ferro. As sequências de bandas mais ricas e mais pobres em ferro teriam resultado da alternância de estados óxidos e anóxicos, que seriam promovidos por processos bioquímicos relacionados com ciclos anuais, solares e outros, como os de Milankovitch.

[3] Do latim *albēdō* = "brancura", derivado *albus* = "branco". É a razão entre a radiação reflectida por uma superfície e a radiação nela incidente, ou seja, é o poder de reflexão dessa superfície

O modelo de Rosing *et al.*, foi sujeito a várias críticas, designadamente porque o albedo da água não é suficientemente baixo, e porque possivelmente a maior quantidade de gases de estufa na atmosfera induziria a existência de mais nuvens. Por outro lado, não está comprovado que os núcleos de condensação induzidos biologicamente fossem muito mais escassos: é mesmo possível que, como a Terra rodava muito mais rapidamente nessa altura e a Lua estava mais próxima, provocando marés bastante maiores, a quantidade de nuvens fosse bastante maior que actualmente.

Assim, parecia não haver forma de conciliar bem as condições físicas e químicas da Terra há uns 3,8 mil milhões de anos (altura em que presumivelmente se desenvolveu a vida) por forma a compensar a menor energia recebida pelo planeta devido à existência de um Sol jovem, 25 a 30% mais fraco do que actualmente. Surge, então, da parte dos astrofísicos, um outro tipo de abordagem: rever o modelo de evolução do Sol. Exemplo deste novo tipo de abordagem foi o trabalho apresentado, em 2003, pelos astrónomos norte-americanos I.-Juliana Sackmann e Arnold I. Boothroyd, do California Institute of Technology (CALTEC), que, com base em novos dados sobre estrelas análogas ao Sol, admitiram que a massa inicial deste poderia ser um pouco maior do que é geralmente aceite (1,01 a 1,07 vezes maior), tendo perdido na fase juvenil entre 4 a 7% dessa massa. Tal teria sido suficiente para que, há 3,8 mil milhões de anos, a luminosidade do Sol fosse 85% da actual, no caso da massa solar inicial ser 1,07 vezes maior do que era geralmente admitido, sendo esses valores, respectivamente, de cerca de 80% para uma massa solar de 1,04, e de uns 77% se a massa solar inicial fosse de 1,01 (figura II.5). Portanto, neste caso, o Sol da altura seria apenas 15 a 23% mais fraco do que o actual, bastante diferente dos 30% que vulgarmente são considerados. Com este panorama, já não havia necessidade de considerar a existência de enormes quantidades de gases de estufa na atmosfera terrestre para que a superfície não atingisse o estado de congelamento generalizado.

Mais de 40 anos após a formulação inicial do paradoxo do Sol jovem e fraco a questão continua a não estar convenientemente resolvida. A cada ano que passa surge mais uma mão cheia de artigos sobre o assunto. Apenas a título exemplificativo, refere-se um dos últimos artigos que tenta encontrar soluções para o problema, da autoria de Vladimir S. Airapetian e seus colegas da NASA, publicado em meados de 2016 na *Nature Geoscience*. Aí, os autores, baseando-se em conhecimentos recentes obtidos com o estudo de estrelas do tipo Sol que se encontram ainda na fase jovem, admitem que, há uns 3,8 mil milhões de anos, os fluxos magnéticos gerados pelas erupções solares seriam, talvez, dez vezes maiores do que os actuais. Essas mega-erupções solares induziriam fortes tempestades magnéticas, isto é, ventos solares muito intensos, cujas partículas, muito energéticas, comprimiriam a magnetosfera terrestre, provocando extensas aberturas do campo magnético em torno das calotes polares, o que permitiria que essas partículas atingissem a Terra (normalmente protegida pela sua magnetosfera), penetrando na atmosfera, e aí suscitando reacções de conversão das moléculas de azoto, de dióxido de carbono e de metano em protóxido de azoto (N_2O), um gás com potente de efeito estufa. Desta forma, as concentrações de dióxido de carbono e de metano atmosférico seriam mantidas em níveis modestos, mas, juntamente com o protóxido de azoto, desenvolveriam em efeito de estufa suficientemente forte para manter a superfície terrestre com temperaturas relativamente amenas.

Ao pormenorizarmos um pouco mais a problemática associada ao paradoxo do Sol jovem e fraco tivemos fundamentalmente em vista dois objectivos complementares. Por um lado, evidenciar as grandes deficiências de conhecimento que ainda temos, as quais, com frequência, dificultam a percepção abrangente e a correcta interpretação dos processos (designadamente de índole climática) que ocorreram no passado e dos que influenciam o

nosso quotidiano. Por outro lado, exemplificar a forma como decorrem os processos científicos. Actuando na complexa fronteira entre o conhecido e o desconhecido, a Ciência vai progredindo de forma algo titubeante, tendo como base a observação e a experimentação, cujos resultados permitem a formulação de hipóteses, que terão que ser confirmadas ou infirmadas por novas observações e experimentações, num jogo de constantes avanços e recuos, cuja resultante é, sempre, a progressiva diminuição do nosso nível de ignorância. O exemplo do paradoxo do Sol jovem e fraco demonstra, ainda, como se processa a investigação científica, que decorre em moldes substancialmente diferentes dos imaginados pelo cidadão comum, afastado destas lides. Divulgar os resultados de observações, experimentações ou hipóteses através de um artigo publicado numa revista científica, por mais credenciada que ela seja, não produz qualquer verdade científica. Um dos princípios básicos da Ciência é a replicação. Assim, só se o processo estiver isento de erros de raciocínio ou de incorrecções científicas (o que é avaliado pela generalidade da comunidade científica) e só se os mesmos resultados forem obtidos por outras equipas independentes, é que se inicia a construção de novas verdades científicas.

Por essas razões, o paradoxo do Sol jovem e fraco continua sem estar resolvido. Porém, estamos já muito distantes da formulação inicial estabelecida, em 1972, por Carl Sagan e George Mullen. É hoje tomado como verdade que, há uns 3,8 mil milhões de anos, o Sol era significativamente menos intenso que o actual. É hoje aceite que, nessa altura, se não houvesse outros factores intervenientes, a superfície da Terra estaria congelada, o que impossibilitaria o desenvolvimento da vida. É hoje genericamente reconhecido que a composição da atmosfera da altura, com elevada proporção de gases com efeito de estufa, teve papel determinante na manutenção de temperaturas superficiais acima das do congelamento da água. Porém, continua sem se saber exactamente quais eram esses gases e os teores em que existiam na atmosfera, e quais foram os outros factores intervenientes. Relativamente a 1972, os avanços científicos conseguidos foram muito grandes. Todavia, relativamente a 1972, a quantidade de novas perguntas sem resposta satisfatória é muito maior. É assim que funciona o processo científico. É a eterna repetição do princípio contido na frase atribuída a Sócrates: *Quanto mais sei, mais sei que nada sei.* É assim que, a cada dia que passa, a Ciência se vai consumando.

II.4. O clima e os movimentos da Terra

II.4.1. Energia solar *versus* outras fontes energéticas

Como se tem vindo a referir, a Terra recebe a sua energia do Sol. Certo que há outros factores envolvidos no balanço energético do nosso planeta, mas a médio / longo prazo constituem apenas pequenas perturbações do sistema climático induzido pela energia radiante solar que chega até nós. É o caso do calor interno da Terra: o calor que emana do núcleo e do manto é transmitido através da crosta. No entanto, na própria crosta, as rochas integram elementos radioactivos que estão constantemente a desintegrar-se, e que, por consequência, produzem também calor. Assim, ao descermos em profundidade (como, por exemplo, nas minas profundas), a temperatura vai aumentando. Esse aumento de temperatura com a profundidade designa-se por "grau geotérmico", que é definido como a profundidade em metros que é preciso descer para que a temperatura aumente de 1ºC, e que normalmente tem o valor de 33 metros. Como é evidente, o valor do grau geotérmico varia em função de vários factores, entre os quais a maior ou menor proximidade a aparelhos vulcânicos activos e a condutividade térmica das rochas. De uma ou de outra forma, esse calor chega à superfície, provocando, eventualmente, pequenas perturbações no clima.

Outra forma desse calor interno chegar à superfície é através do vulcanismo, o qual provoca aquecimento da crosta circundante e da atmosfera sobrejacente. Esta introdução de energia induz modificações climáticas locais ou regionais, mas de curta duração e de pouco significado no balanço energético global do planeta. Claro que, se tivermos em consideração outras consequências não directamente relacionadas com a libertação de calor, como seja a emissão de poeiras para a alta atmosfera, o vulcanismo pode ter grande importância. Já na parte I aludimos a esses efeitos e aprofundaremos mais o assunto na parte III. Porém, por agora, estamos centrados apenas no balanço energético.

Também a chegada à Terra de outros corpos astronómicos, como os asteróides, os meteoróides e os cometas, podem induzir perturbações de índole climática. É evidente que um meteoro[1], ao atravessar a atmosfera e, devido à fricção, fica incandescente, vai-se consumindo e libertando calor. Aquece, portanto, a atmosfera por onde passa. Porém, tal constitui uma pequeníssima perturbação, praticamente insignificante no computo global. Porém, esses corpos astronómicos, quando são maiores, atravessam toda a atmosfera sem se consumir totalmente, acabando por impactar a superfície terrestre. Apelidam-se, neste caso, de meteoritos. Como é evidente, esses impactos libertam também energia. Na esmagadora maioria dos casos, a energia libertada é, também, insignificante no computo global. Exceptuam-se, todavia, alguns casos muito raros em que esses objectos têm dimensões maiores, de ordem decamétrica ou maior, em que a energia assim libertada pode ter um pouco mais de significado, sempre muito pequeno, no balanço energético da Terra. Tal como referimos a propósito do vulcanismo, temos apenas em consideração o aspecto térmico, pois

---

[1] Designa-se por "meteoro", o fenómeno que ocorre na atmosfera quando um corpo proveniente do espaço a atravessa, deixando um rasto luminoso, o que vulgarmente se chama uma estrela cadente. O termo provém do grego μετέωρος [metéōros], plural de μετέωρον [metéōron], literalmente "coisa no alto" e, portanto, referindo-se a fenómenos celestes, coisas que acontecem nos céus, através do latim *meteorum*. Portanto, inicialmente, referia-se a fenómenos que se passavam no céu, por cima de nós, de onde derivou, por exemplo, a palavra meteorologia. Entre outros, o termo era aplicado ao vento (meteoros aéreos), à chuva e à neve (meteoros aquosos), aos arco-íris e auroras boreais (meteoros luminosos) e aos relâmpagos e estrelas cadentes (meteoros ígneos). O termo só reduziu o seu âmbito de aplicação, passando a significar especificamente estrela cadente, em tempos modernos.

que há outras consequências que podem induzir perturbações climáticas de grande relevância. As consequências dos impactos de objectos celestes será mais aprofundado no ponto II.7.

Portanto, todos estes factores correspondem, do ponto de vista térmico directo, a não mais do que ínfimas perturbações do sistema. Como se referiu, o grande motor climático, no curto, médio e longo prazo, é o calor que a Terra recebe através da energia radiante solar. Porém, a quantidade de calor recebido pelo planeta depende de todos os movimentos que este tem e de muitos outros factores, tanto exógenos, como endógenos.

II.4.2. Movimento de rotação

Se, como durante muito tempo se pensou, a Terra fosse plana, o clima seria tendencialmente igual em todos os pontos, pois que a quantidade de radiação recebida do Sol seria a mesma em todos os locais. Porém, como é esférica, o equador recebe mais energia do que os pólos, visto que o ângulo de incidência da radiação solar é ali maior (a meio do dia é aproximadamente vertical) do que nas latitudes mais elevadas (onde os raios solares chegam obliquamente). Acresce que, como a Terra gira em torno do eixo de rotação, as zonas intertropicais estão mais afastadas desse eixo do que as regiões polares. Na realidade, esse movimento de rotação provoca deformação do globo, tornando-o mais alargado na região equatorial e achatado nos pólos. O mesmo se verifica com a atmosfera, que é deformada por esse movimento de rotação, tornando-se mais espessa nas zonas intertropicais e mais fina nas altas latitudes. Portanto, essas zonas intertropicais aquecem mais, não só porque os ângulos de incidência dos raios solares são maiores, mas também porque, aí, a atmosfera, sendo mais espessa, tem maior poder de absorção da energia radiante solar. Este diferencial de energia recebida pelas zonas situadas a baixas latitudes e as que se localizam a latitudes maiores induz gradientes térmicos que constituem um dos principais mecanismos climáticos da Terra.

Por outro lado, o movimento de rotação provoca a sucessão dos dias e das noites. Dias, em que a parte da Terra virada para o Sol deste recebe energia, aquecendo. Noites, em que a essa parte do planeta se encontra do lado oposto ao do Sol e, portanto, deste não recebe energia; pelo contrário, emite energia para o espaço e, por consequência, arrefece. Definem-se, assim, dois hemisférios: um em que é dia e a superfície vai aquecendo; outro em que é noite, e que vai arrefecendo. Constituem-se, desta forma, importantes gradientes térmicos que têm grande influência nos padrões climáticos.

Já no ponto I.2 discorremos um pouco sobre os efeitos que o movimento de rotação da Terra tem no clima e sobre os balanços energéticos, pelo que nos isentamos de aprofundar agora mais o assunto.

Todavia, é relevante acrescentar que, como é sabido, o eixo de rotação está inclinado cerca de 23,4º relativamente ao plano da eclíptica[1], o que provoca assimetrias nos gradientes térmicos, e a que nos referiremos com um pouco mais de pormenor quando abordarmos o movimento de translação. No entanto, o eixo de rotação não é fixo. Tem várias flutuações, umas com magnitude maior, que abordaremos nos outros movimentos da Terra, e outras com pequena magnitude, que não são ainda completamente compreendidas. Com efeito, desde que se

---

[1] O plano da eclíptica corresponde ao plano definido pelo movimento de translação da Terra em redor do Sol. Inicialmente era definido como linha eclíptica, isto é, a linha seguida pelo caminho aparente do Sol na esfera celeste. O termo deriva do grego antigo ἐκλειπτική [ecleiptiké], derivado de ἐκλείπω [ekleípō] = "desaparecer", "abandonar", por sua vez proveniente de ἐκ [ek] = "fora" + λείπω [leípō] = "deixar", "ausentar", através do latim medieval eclīptica. Correspondia, portanto, à linha do céu em que o Sol desaparecia diariamente, e em que, por vezes, o Sol ou a Lua também desapareciam, isto é, se eclipsavam. Aliás, é a mesma raiz de eclipse.

iniciaram as observações, em 1899, os pólos de rotação oscilam de forma irregular ao longo do tempo. Por exemplo, ao longo da maior parte do século XX, o pólo norte de rotação foi derivando para Oeste, no sentido do Canadá, a uma taxa de cerca de 9 centímetros por ano. Porém, por volta do ano 2000, a deriva do eixo de rotação mudou de forma abrupta, passando a deslocar-se para Leste, na direcção das Ilhas Britânicas, a uma taxa de quase 17 centímetros por ano. Esta deriva do pólo norte tem sido interpretada de formas diversas, nomeadamente como consequência de processos de reajustamento isostático[1] ou de variações na extensão da calote polar.

Em trabalho muito recente, de 2016, Surendra Adhikari e Erik Ivins, do *Jet Propulsion Laboratory* da NASA, associam a mudança abrupta de comportamento da deriva polar a redistribuições de massa na superfície terrestre, relacionadas com variações da quantidade de neve acumulada nos continentes e a depleção nos reservatórios de água subterrânea. As deficiências hídricas registadas na Eurásia, em especial no subcontinente indiano e na região do Mar Cáspio, devidas a consumo e a secas, parecem ser as principais responsáveis, até porque o eixo de rotação é particularmente sensível a alterações de massa que ocorrem a latitudes médias, por volta de 45º. Por essa razão, segundo os investigadores aludidos, os anos secos correspondem, em geral, a pequenas migrações do pólo norte de rotação para Leste, enquanto nos anos húmidos se verifica deriva para Oeste.

Portanto, como o eixo de rotação não é estável, as pequenas variações a que é sujeito implicam pequeníssimas alterações nos gradientes estabelecidos pela radiação solar recebida latitudinalmente. É certo que estas variações são ínfimas, aparentemente irrelevantes. No entanto, a tais variações podem estar associadas outras alterações (atmosféricas e oceânicas), que podem, eventualmente, induzir perturbações climáticas com alguma relevância. Tal tende a demonstrar que: a) o conhecimento que temos do planeta que co-habitamos é, ainda, bastante limitado; b) há muitos factores do sistema climático que compreendemos mal e, muito provavelmente, alguns que ainda desconhecemos quase por completo; c) só através do investimento continuado na investigação científica podemos almejar a conhecer bastante melhor o nosso planeta, nomeadamente o seu sistema climático.

---

[1] Designa-se por isostasia o estado de equilíbrio gravitacional entre a crosta e o manto, ou, de forma mais precisa, entre a litosfera e a astenosfera (a zona superior do manto). De modo simplista, refere-se ao equilíbrio entre as forças que tendem a afundar a litosfera, sólida, na astenosfera, "líquida", na qual flutua. O termo provém do grego antigo ισοστατέω [isostatéo] = "pesar igual", "estar em equilíbrio", composto por ίσως [isos] = "igual" + στατός [statos] = "parado", "em pé", "em equilíbrio". O adjectivo derivado é ισοστάσιος [isostasios] = "equilibrado", "de igual peso". Quando há uma glaciação, a grande massa de gelo acumulada sobre o continente faz com que este se afunde mais na astenosfera, "empurrando" este material, que se comporta como líquido sob solicitações lentas, para os lados, isto é, para zonas não glaciadas. Quando termina a glaciação e a massa de gelo desaparece, estabelece-se um desequilíbrio isostático, pois a litosfera fica mais "leve" e tende a emergir, mas para que tal aconteça é preciso que o material da astenosfera se desloque novamente para a zona da litosfera em desequilíbrio. Estes movimentos designam-se por movimentos de compensação isostática. Como a viscosidade do material astenosférico é muito elevada, estes movimentos são muito lentos, demorando, por vezes, muitos milhares de anos. Por exemplo, na Fenoscândia (região que abrange, entre outras, a península Escandinava e a região da Carélia, onde se localizam a Suécia, a Noruega, a Dinamarca e a Finlândia) estão, ainda hoje, em desequilíbrio isostático, devido ao final do último glaciário e transição para o actual interglaciário. Por essa razão, nos litorais dessa região, o nível médio do mar relativo (tomando como referência o continente adjacente) está a descer, ao contrario do que se verifica na maior parte dos litorais do resto do mundo.

II.4.3. Movimento de translação

Já no ponto I.2.2. discorremos sobre os efeitos que o movimento de translação da Terra em redor do Sol tem no sistema climático, pelo que, agora, apenas adicionaremos alguns complementos.

O nosso planeta descreve uma órbita elíptica, mas quase circular, em torno do Sol. Portanto, a Terra está constantemente a mudar de posição em relação à estrela central do nosso sistema. Como o eixo de rotação da Terra está inclinado relativamente ao plano da eclíptica, mantendo a mesma posição ao longo do ano, tal tem como consequência que a quantidade de radiação solar que incide em cada um dos hemisférios (Norte e Sul) vá progressivamente variando (figura I.3.). Tal gera diferenças térmicas responsáveis pelo desenvolvimento das estações e pelos ciclos de aquecimento e arrefecimento hemisféricos.

Como se referiu, a órbita que a Terra descreve em torno do Sol é elíptica, mas quase circular. No periélio[1], a Terra dista do Sol cerca de 147 milhões de quilómetros, e no afélio[2] aproximadamente 152 milhões de quilómetros, ou seja, a excentricidade da órbita é 0,0167. Portanto, as variações das distâncias da Terra ao Sol são, apenas, da ordem de 3%, o que faz com que a energia radiante recebida no periélio e no afélio tenha uma diferença de cerca de 6%. Se o eixo de rotação da Terra não estivesse inclinado, as variações climáticas induzidas por estas diferenças de distâncias seriam pequenas, ou seja, os hemisférios Norte e Sul da Terra receberiam quase a mesma quantidade de radiação ao longo do ano. Todavia, devido à inclinação do eixo de rotação da Terra, essas variações são, como é sabido, muito significativas. Diga-se, desde já, que a excentricidade aludida não é constante ao longo do tempo, o que faz com que a distância da Terra ao Sol varie entre 129 e 187 milhões de quilómetros. Há 128 000 anos, a excentricidade da órbita era de cerca de 0,04 o que fazia com que a energia recebida pela Terra entre o periélio e o afélio tivesse uma variação de, aproximadamente, 16%.

Devido à actual inclinação do eixo de rotação da Terra, no periélio o Hemisfério Norte recebe mais energia radiante solar do que o Hemisfério Sul. É o solstício[3] de Verão, em que, nas regiões polares do Hemisfério Norte (localizadas a norte de, *grosso modo*, 66ºN), é permanentemente dia, sendo possível observar o célebre *Sol da meia-noite*. No afélio, a situação inverte-se: o eixo de rotação fica inclinado para o lado contrário ao do Sol, o que faz com que o Hemisfério Sul receba mais energia radiante solar. Corresponde ao solstício de Inverno.

---

[1] Periélio é o ponto da órbita de um corpo celeste em que este está mais próximo do Sol. Do grego antigo περί [perí] = "próximo" + ἥλιος [hḗlios] = "Sol", através da latinização moderna *perihelium*. O termo foi introduzido por Johannes Kepler (1571-1630), em 1596, na sua obra "Prodromus dissertationum ...".

[2] Afélio é o ponto da órbita de um corpo celeste em que este está mais afastado do Sol. Do grego antigo ἀπό [apo] = "de", "distante", "longínquo" + ἥλιος [hḗlios] = "Sol", através da latinização moderna *aphelium*. O termo parece ter sido introduzido por Johannes Kepler (1571-1630), em 1596, na sua obra "Prodromus dissertationum ...".

[3] Solstício é o momento em que o Sol, no seu movimento aparente no céu, atinge a maior declinação. Corresponde ao maior dia (solstício de Verão, a 21-22 de Junho) ou à maior noite (solstício de Inverno, a 21-22 de Dezembro) do ano. O termo provém do latim *solstitium*, formado por sol = "Sol" + *stāre* = "estar parado", infinitivo do verbo *sistere* = "fazer parar", "permanecer", significando, portanto, "Sol parado", o que advém do facto do Sol, quando chega à latitude dos trópicos no seu movimento aparente, parecer que se desloca mais lentamente em relação à sua posição no dia anterior.

Como o eixo da Terra mantém sempre a mesma inclinação ao longo do ano, na órbita de translação há momentos em que esse eixo fica paralelo ao Sol. Tal ocorre nos equinócios[1], sendo nessas alturas a duração do dia igual à da noite e, portanto, ambos os hemisférios recebem a mesma quantidade de energia solar.

Assim, ao longo do ano, os hemisférios terrestres vão recebendo quantidades diferentes de energia solar, o que causa a sucessão das estações e as heterogeneidades climáticas principais existentes entre ambos os hemisférios (não considerando, por agora, outros factores, entre eles as diferentes percentagens de áreas oceânicas).

II.4.4. Precessão do eixo de rotação (Precessão dos Equinócios)

A Terra é uma "bola" que gira em torno do Sol, tal como vários outros planetas e corpos astronómicos. Principalmente o Sol, mas também os outros corpos, exercem influências na Terra que perturbam os seus movimentos de rotação e de translação. Por outras palavras, devido a essas influências, o nosso planeta tem vários outros movimentos que actuam a escalas temporais mais longas.

Um desses movimentos é o da precessão[2] do eixo de rotação, vulgarmente designado por precessão dos equinócios, assim chamado porque as posições equinociais, tendo como referência as estrelas distantes consideradas fixas, se movem para Oeste ao longo da eclíptica, em sentido oposto ao do movimento aparente do Sol. Por essa razão, os equinócios vão-se antecipando um pouco uns aos outros à medida que o tempo passa, o que provoca mudança da posição aparente dos astros no céu.

Refira-se que, embora precessão do eixo e precessão dos equinócios sejam vulgarmente utilizados como sinónimos, em rigor são coisas distintas. A confusão entre as duas expressões decorre de ambos serem motivados pela inclinação axial da Terra. Porém, no caso da precessão dos equinócios há um outro factor interveniente: a excentricidade da órbita da Terra. É por essa razão que, por exemplo, as datas do solstício de Inverno e do periélio não são, em geral, coincidentes.

II.4.4.1. Causas

Tal acontece porque a Terra não é uma esfera perfeita, mas sim um esferóide cujo diâmetro equatorial, devido aos efeitos da rotação, é cerca de 43 quilómetros maior do que o diâmetro polar (ou seja, é mais bojuda na região equatorial e achatada nos pólos), e porque o planeta sofre a atracção conjugada do Sol e da Lua. Durante metade do ano, a parte mais bojuda que está mais próxima do Sol sofre deste uma atracção maior ao longo do plano da eclíptica, pois que o Sol está nesse plano, tal como o está, aproximadamente, a Lua. Porém, como o eixo de rotação da Terra está inclinado cerca de 23,3º em relação à perpendicular ao plano da eclíptica, o equador e, portanto, a parte mais bojuda, está, também, inclinado segundo o mesmo ângulo (figura II.6). Tal significa que a principal força de atracção não se exerce no

---

[1] Equinócio é o momento em que o Sol, no seu movimento aparente no céu, cruza o equador celeste. É a altura em que a noite tem duração igual à do dia, o que acontece por volta de 20 de Março e 23 de Setembro. O termo provém do latim *aequinoctium*, formado por *aequus* = "igual" + *nox* = "noite" (nominativo masculino singular de *noctis*), significando, portanto, "noites iguais", ou seja, ocasiões em que o dia e a noite duram o mesmo tempo.

[2] Precessão é o acto ou efeito de preceder. O termo tem origem no latim tardio *praecissionem* = "acto de preceder", "precedência", derivado do verbo *praecissiō* = "vir antes", "preceder" + *–ion*, sufixo que denota acção ou condição, significando, portanto, "precedência", " antecedência".

equador (a parte mais bojuda), mais sim numa zona em que o bojo não é tão pronunciado, correspondente aos trópicos. Como resultado, há uma força que tende a "puxar" o equador "para cima" (na situação representada na figura II.6), isto é, para o plano da eclíptica, ou, por outras palavras, que tende a "endireitar" o eixo de rotação, tornando-o perpendicular ao plano de translação da Terra (o plano da eclíptica). Na parte oposta da Terra ocorre situação inversa. Como, pela Lei da gravitação universal (formulada por Newton, em 1687) a força de atracção é inversamente proporcional ao quadrado da distância, e essa parte está mais afastada do Sol, a força aí exercida é menor. Portanto, como de um lado a força é maior e, do outro, menor, o centro de rotação fica descentrado relativamente ao centro da Terra. No sentido de se tentar estabelecer o equilíbrio, desenvolve-se uma força resultante que tende a puxar o equador, nessa zona mais afastada do Sol, "para baixo" (na situação representada na figura II.6). Devido ao atrito e à inércia interna, pode dizer-se, em linguagem simplista, que tudo se passa como se houvesse uma resistência à rotação da Terra, do que resulta mudança de direcção do eixo de rotação, sem alterar a sua inclinação.
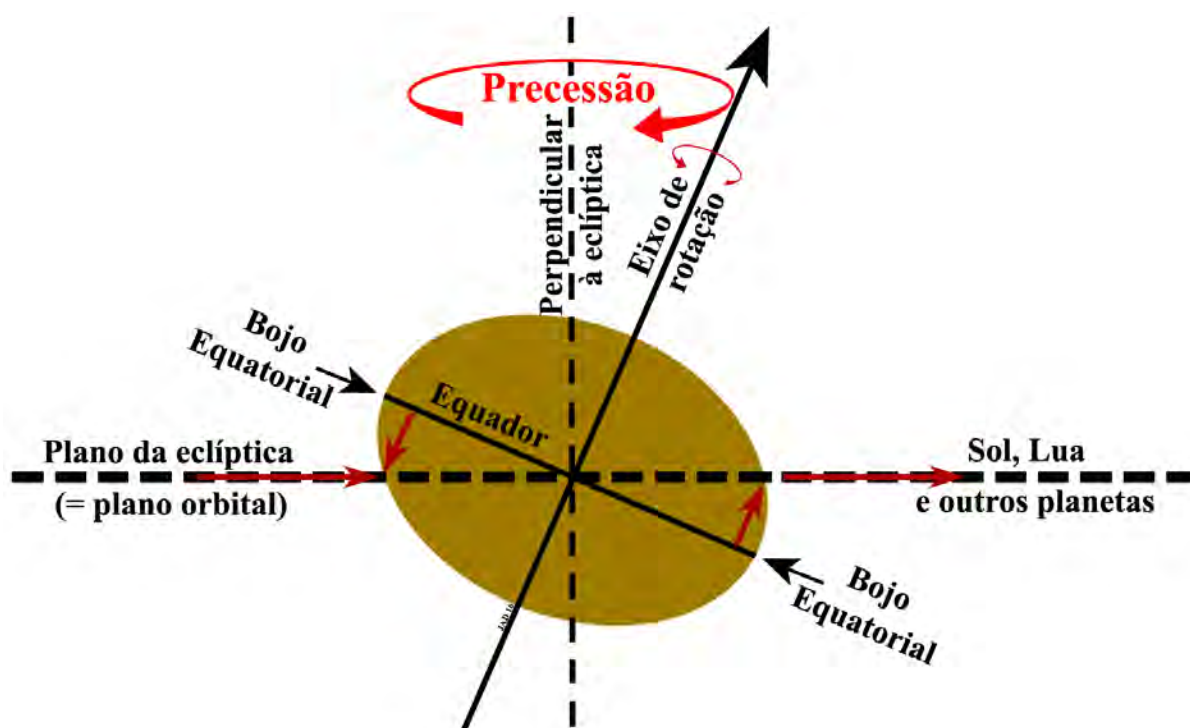
Figura II.6 – Representação esquemática das forças responsáveis pela precessão do eixo da Terra. Para melhor se perceber a ideia o achatamento da Terra (a castanho) foi fortemente exagerado. As setas vermelhas mais longas representam a atracção exercida pelo Sol e pela Lua, que tendem a puxar o equador para o plano da eclíptica.

Esta precessão do eixo de rotação é evidente quando lançamos um pião e observamos a forma como gira em torno do seu eixo. Assim que a velocidade de rotação começa a ser afectada pelas irregularidades do pião e a acção da força da gravidade se torna relativamente mais importante, o eixo de rotação começa a oscilar, descrevendo um cone no espaço. A grande diferença é que, no caso do pião, a força da gravidade actua em sentido mais ou menos paralelo ao do eixo de rotação, enquanto na Terra essa força (exercida pelo Sol, mas também pela Lua) tem direcção grosseiramente perpendicular a esse eixo.

Como a rotação da Terra se processa no sentido contrário ao dos ponteiros do relógio (de Este para Oeste), as forças gravitacionais aludidas forçam o eixo de rotação a mover-se no sentido inverso (ou seja, no sentido dos ponteiros do relógio, de Oeste para Este). Deste jogo de

forças resulta que o eixo de rotação da Terra se vai movendo, a pouco e pouco, no sentido horário, descrevendo no espaço um cone ou, de forma mais simplista, um círculo em torno do seu eixo orbital (figura II.7). Como consequência, a cada ano que passa, a Terra ocupa a mesma posição no espaço que tinha no ano anterior um pouco mais cedo, ou seja, em posição precedente à que tinha no passado (cerca de 50" de grau). Tal verifica-se em todas as posições que a Terra ocupa ao longo da translação em torno do Sol, nomeadamente com as posições equinociais, razão porque vulgarmente se designa este movimento por precessão dos equinócios. É um movimento bastante lento, que não é minimamente perceptível no nosso quotidiano. O tempo que a Terra leva a ocupar novamente a mesma posição no espaço relativamente ao Sol, isto é, o período deste movimento de precessão, é de 25 765 anos. Por isso, a cada 71 anos, o equinócio é antecipado de um dia.
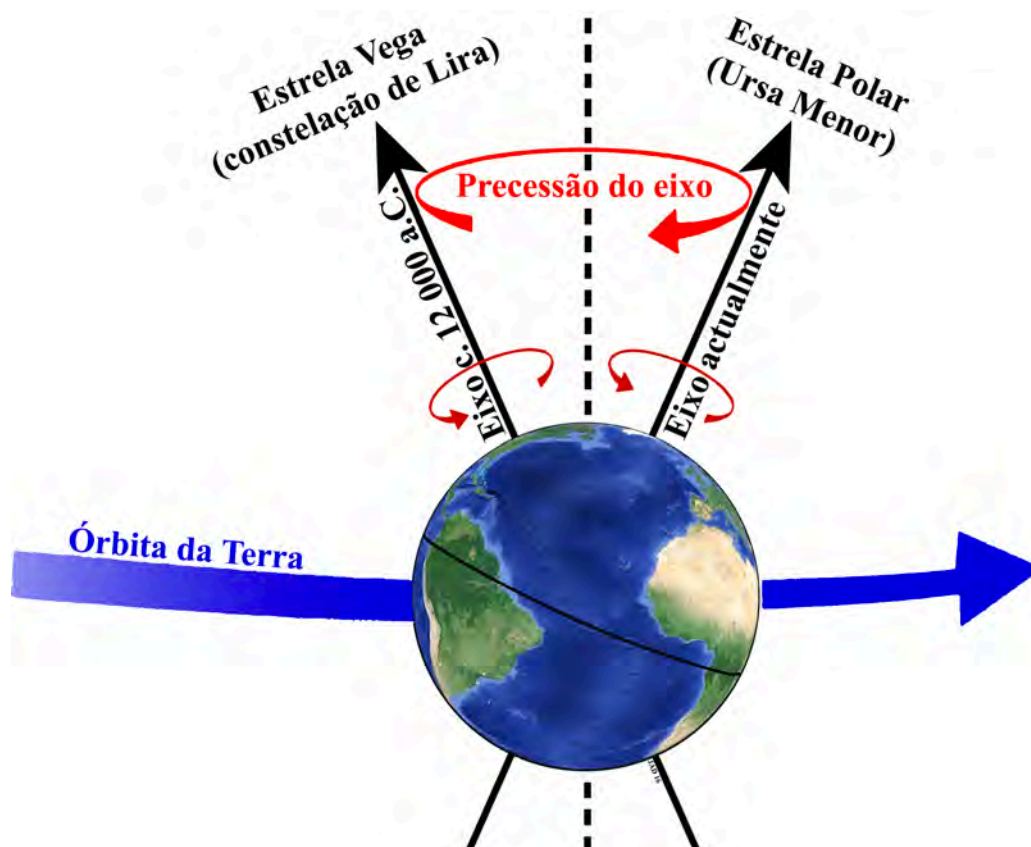
Figura II.7 – Representação esquemática da precessão do eixo da Terra. A seta grossa azul corresponde à órbita da Terra, que o mesmo é dizer, ao plano da eclíptica.

O Sol, devido à sua grande massa, tem grande importância nesta precessão do eixo de rotação. Porém, a Lua, com massa muitíssimo menor, está muito mais perto da Terra, e como a atracão gravitacional é inversamente proporcional ao quadrado da distância, o nosso satélite natural tem, também, relevância no movimento de precessão. Porém, a órbita da Lua não é exactamente coincidente com o plano da eclíptica, oscilando cerca de 5° em relação a esse plano, o que torna mais complicados os movimentos da Terra. A acção combinada do Sol e da Lua é chamada de precessão lunisolar. Refira-se que o Sol e a Lua, devido às suas mudanças de posições relativas, são responsáveis por outras pequenas variações periódicas, das quais a mais conhecida é o ciclo nodal lunar, com período de 18,6 anos. Mas estes movimentos serão abordados mais à frente.

II.4.4.2. Consequências

Devido à precessão do eixo da Terra, as posições dos pólos norte e sul celestes parecem mover-se em círculos quando se têm como referência estrelas distantes, consideradas fixas. Cada um desses círculos é descrito, em média, em 25 772 anos julianos. Nos nossos dias, a parte norte do eixo de rotação (o pólo norte) está direccionada para a estrela Polar (da Ursa Menor), mas por volta de 12 000 anos a.C. (figura II.7 e II.8), o eixo estava no enfiamento da estrela Vega, da constelação Lira, para onde voltará a ficar dirigido daqui a cerca de 11 000 anos.
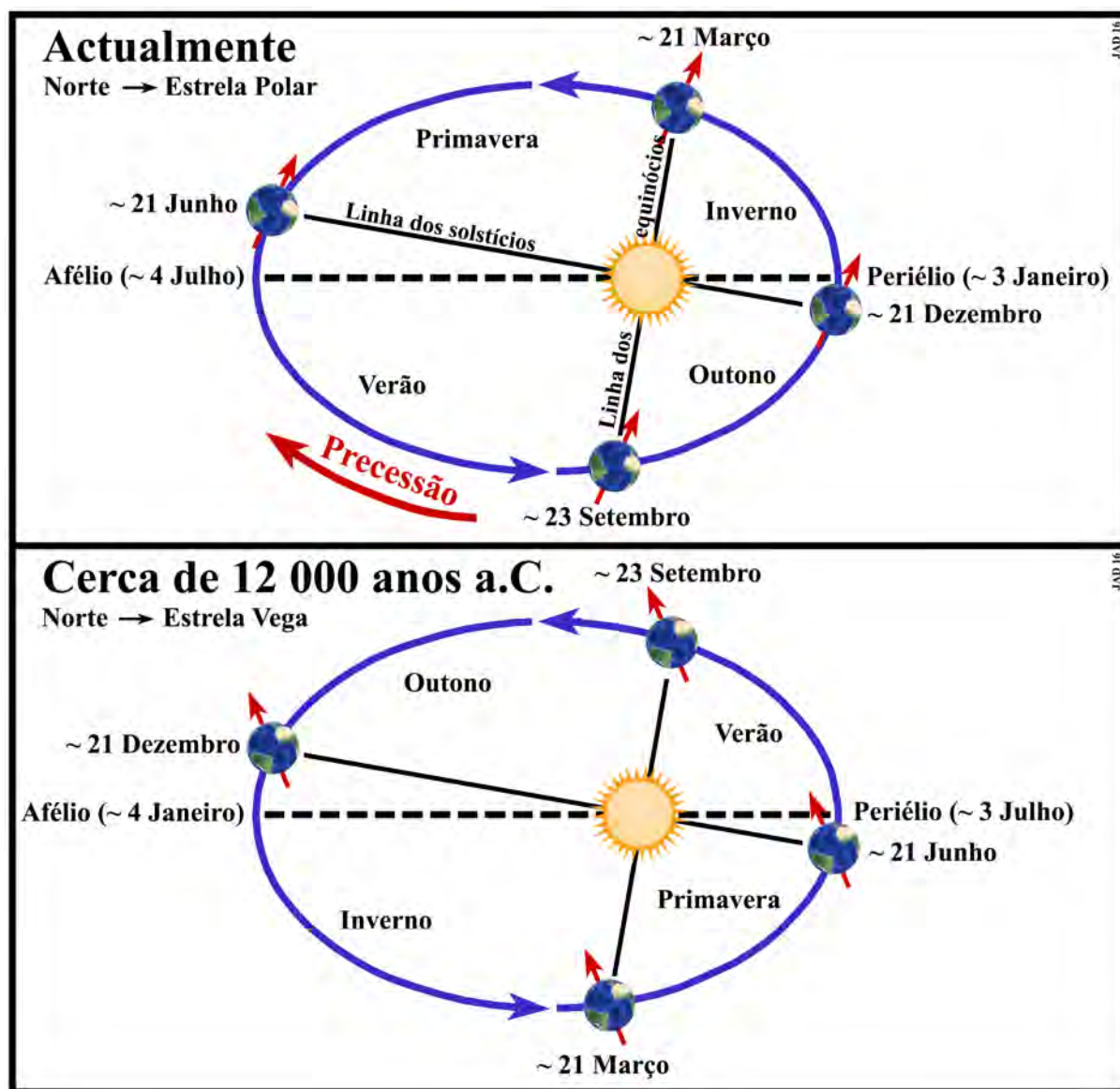
Figura II.8 – A precessão do eixo da Terra faz com que o início das estações do ano se vá antecipando progressivamente. Por volta de 12 000 a.C. a parte norte do eixo de rotação da Terra apontava para a estrela Vega, da constelação de Lira, e as estações do ano ocorriam meio ano antes do que acontece nos nossos dias. Na figura as proporções foram exageradas para melhor compreensão e as estações do ano referem-se ao hemisfério Norte.

Devido à precessão do eixo (e também à excentricidade da órbita, de que trataremos a seguir), o periélio, que actualmente é atingido cerca de 2 semanas após o solstício de Dezembro (e o afélio, 2 semanas após o solstício de Junho), vão variando de forma retrógrada, isto é, vão

ocorrendo cada vez mais cedo. Assim, há uns 12 000 anos, o periélio ocorria no início de Julho, e o afélio no início de Janeiro (figura II.8). Assim, os início das estações do ano vão ocorrendo um pouco mais cedo a cada ano que passa, embora disso não nos apercebamos no quotidiano. Porém, em escalas milenares, tal é muito significativo.

Daqui a uns 11 000 anos a situação será inversa da actual, tal como ocorreu cerca de 12 000 anos a.C. (figura II.8). Nos nossos dias, quando a Terra se aproxima da sua distância mais próxima do Sol (periélio), em que, como é óbvio, o planeta recebe mais energia radiante solar, verifica-se a transição do Outono para o Inverno (no Hemisfério Norte). Em 13 000 d.C. o periélio será atingido no início de Julho, e mais ou menos nessa ocasião dar-se-á a passagem da Primavera para o Verão. Como o eixo de rotação apontará, nessa altura, para o lado do Sol, ao contrário do que acontece actualmente, tal significa que, no hemisfério norte, os Verões serão bastante mais quentes. Pela mesma ordem de razões, quando a Terra estiver mais afastada do Sol, ou seja, no afélio, ocorrerá a passagem do Outono para a Primavera (no Hemisfério Norte) e, devido à orientação do eixo de rotação, na região polar norte será noite persistente (actualmente é o período em que se pode observar o Sol da meia-noite). Por consequência, os Invernos serão mais rigorosos.

Portanto, a precessão do eixo da Terra tem grande influência no sistema climático, fazendo variar a quantidade de radiação recebida por cada um dos hemisférios. No entanto, como quase tudo o que se refere ao clima, as coisas não são simples. As consequências climáticas desta precessão do eixo são profundamente afectadas por outros movimentos do planeta, que têm periodicidades bastante maiores.

II.4.5. Obliquidade do eixo de rotação

Referiu-se, no ponto anterior, que o eixo de rotação da Terra está inclinado cerca de 23º relativamente ao plano da eclíptica, e que, devido à precessão, o eixo desenha no espaço um cone. Porém, a Terra é uma "bola" que gira em torno de um corpo central, integrado num sistema em que existem vários outros objectos astronómicos, que, de uma ou de outra forma, com maior ou menor intensidade, influenciam a forma como o planeta orbita o Sol. Por isso, o cone que o eixo de rotação descreve no espaço não é simples nem regular: o ângulo de abertura do cone vai-se modificando lentamente dentro de certos limites. Assim, a inclinação do eixo não é constante: vai variando um pouco ao longo do tempo, entre 22,1º e 24,5º.

II.4.5.1. Causas

Como já se referiu antes, o grande factor de estabilização climática da Terra é a Lua. Sem a existência do seu grande satélite natural, o movimento de rotação do nosso planeta seria bastante mais rápido, o que provocaria maior achatamento dos pólos e um bojo mais pronunciado na zona equatorial, assumindo uma obliquidade do eixo de rotação não muito variável. Porém, como foi demonstrado, em 1993, por J. Laskar e colegas do *Bureau des Longitudes* francês, em Paris, sem a Lua, os principais elementos perturbadores da rotação da Terra seriam os outros planetas, o que conferiria comportamento caótico à orientação do eixo de rotação, podendo a inclinação deste variar entre 0º e 85º em poucos milhões de anos. As mudanças climáticas seriam, neste caso, extremas e rápidas. Possivelmente não se teriam estabelecido condições que viabilizassem o desenvolvimento de vida sustentável. É o binário constituído pela Terra – Lua que confere estabilidade ao sistema e, por isso, a inclinação média do eixo de rotação do nosso planeta (ou, dito de outra forma, a obliquidade relativamente à eclíptica) mantém-se em 23,3º, apenas com ligeiras oscilações de ±1,3º.

Muito possivelmente, a inclinação do eixo de rotação do nosso planeta, ou seja, a obliquidade, é uma reminiscência do impacto do planetóide Teia com a Terra, que foi estabilizado, como

se referiu, por acção do sistema binário Terra – Lua. Porém, como o plano da órbita da Lua não é exactamente coincidente com o plano da eclíptica, tendo uma inclinação média da ordem de 5º, e como o sistema sofre, também, influência dos outros planetas, a inclinação do eixo de rotação é oscilante, variando, como se referiu, entre 21,1º e 24,5º, com uma periodicidade de, aproximadamente 41 000 anos. Actualmente, essa obliquidade é de 23,439281º, ou seja, mais ou menos a meio da gama de variações, estando a decrescer cerca de 47" por século. Há uns 10 000 anos, na transição do glaciário para o interglaciário, a inclinação do eixo tinha aproximadamente o valor máximo (24,5º), pelo que as regiões situadas a latitudes elevadas tinham maior diferencial da radiação solar do que o habitual, o que fazia com que os Invernos fossem longos, escuros e frios, e os Verões quentes, sendo mais alargada do que nos nossos dias a zona onde se poderia observar o Sol da meia-noite.

II.4.5.2. Consequências

Tal como foi referido na parte I, como a Terra é aproximadamente esférica, os locais que estão na perpendicular dos raios solares (zona intertropical) recebem mais energia dos que os outros em que os raios solares incidem mais obliquamente (figura I.2). Como a Terra é achatada nos pólos, este efeito é ainda mais ampliado nas regiões polares, isto é, os raios solares atingem a superfície mais obliquamente do aconteceria se o planeta fosse esférico. Nestas condições, compreende-se que uma pequena alteração de poucos graus na inclinação do eixo do rotação possa induzir consequências climáticas de grande relevância.

Consideremos o Círculo Polar Árctico, linha situada por volta da latitude de 66º 33' 55" (em 2016), a norte da qual há, pelo menos, um dia em que o Sol não se põe (está sempre visível) e pelo menos um dia em que é permanentemente noite. Um abaixamento na latitude deste círculo (correspondente a um aumento da obliquidade) implica, no Verão do hemisfério norte, mais tempo de incidência da radiação solar e, portanto, em princípio, maior absorção de energia, o que, por consequência, promove maior fusão dos gelos. No hemisfério oposto, na região antárctica, acontece o inverso: há mais tempo de noite permanente e, por conseguinte, menor absorção de energia radiante solar, o que propicia, presumivelmente, maior expansão das superfícies geladas.

Assim, a latitude dos círculos polares é variável em função das flutuações da inclinação do eixo de rotação, o que faz com que nessas regiões incida mais ou menos radiação solar. Quando a obliquidade aumenta, a amplitude do ciclo sazonal da insolação também aumenta. No Verão (tanto do hemisfério norte, como do sul) a insolação é maior e, no Inverno (de cada um dos hemisférios), é menor, o que faz ampliar os contrastes entre estas estações. Quando a obliquidade diminui, esses contrastes esbatem-se. Porém, este efeito faz-se sentir com maior magnitude nas latitudes elevadas. Lembremo-nos que a maior parte da neve e do gelo do nosso planeta se encontra nas regiões situadas a latitudes mais altas, pelo que, aí, os impactos das variações da obliquidade atingem relevância bastante mais significativa. Com diminuição da inclinação do eixo, os Verões tornam-se frescos nas altas latitudes (pois que a insolação é menor), dificultando a fusão dos gelos acumulados no Inverno anterior. Por isso, a obliquidade está relacionada com o desenvolvimento das fases glaciárias (em que a inclinação do eixo é menor) e interglaciárias (em que essa inclinação é maior), embora essa relação não seja directa, pois que dependem, também, de outros movimentos da Terra de média / longa duração e de outros factores com relevância climática, o que será abordado mais à frente.

Como se referiu, as variações da obliquidade têm maior relevância nas altas latitudes, embora, de uma ou de outra forma, se reflictam a todas as latitudes, até porque afectam (de modo complexo) as trocas de calor entre as várias latitudes, tanto no que se refere à circulação geral da atmosfera, como à circulação termohalina no oceano, nomeadamente a produção de Água

Atlântica de Fundo, que, como se viu no ponto I.2.4., é um processo fundamental na regulação climática do nosso planeta.

II.4.6. Excentricidade da órbita

Como se sabe, a órbita de translação da Terra em torno do Sol tem forma elíptica. O desvio em relação à forma circular é quantificado através de um parâmetro designado por excentricidade, representado pela letra *e*, que mede o afastamento que a intercepção de um plano com um cone recto tem da forma circular (figura II.9). Se o plano é paralelo à base do cone (portanto, perpendicular à linha que une o vértice à base do cone), o valor da excentricidade (*e*) é zero. À medida que o plano de intercepção se torna mais oblíquo, a figura geométrica resultante dessa intercepção passa a ser uma elipse cada vez mais achatada, de tal modo que a excentricidade da elipse varia entre 0 e 1 (exclusivé). Os planetas têm órbitas elípticas. Se o plano de intercepção se torna ainda mais inclinado, fica paralelo à face do cone, e a figura geométrica resultante deixa de ser fechada. Nestas condições, a intercepção desenha uma parábola, em que a excentricidade $e = 1$. Grande parte dos cometas tem órbitas parabólicas, o que significa que, após orbitarem o Sol, se perdem no espaço intergaláctico. Com maior inclinação do plano, a figura resultante da intercepção é uma hipérbole, em que o valor de *e* é maior que 1.
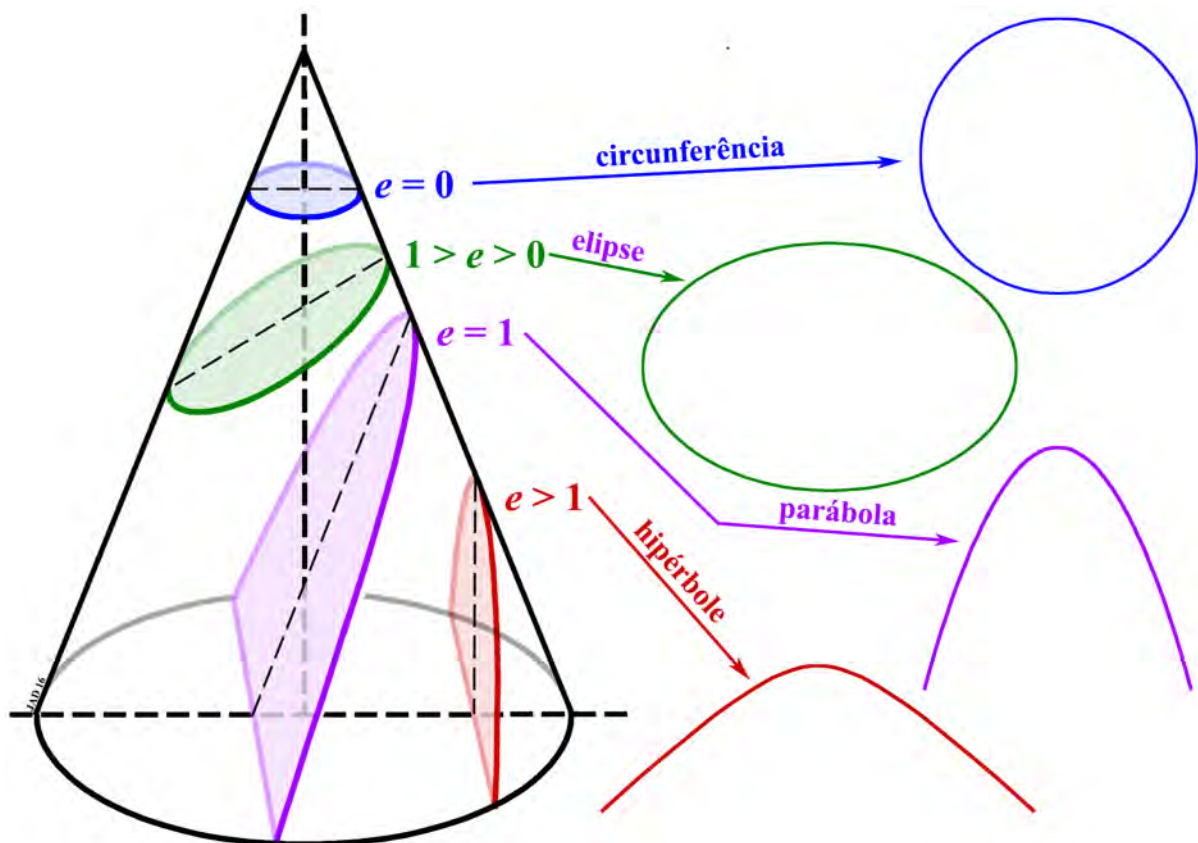
Figura II.9 – Produção de circunferências, elipses, parábolas e hipérboles através da intercepção de um plano com um cone recto.

Deve-se ao célebre astrónomo alemão Johannes Kepler (1571-1630) a descoberta de que as órbitas dos planetas são elípticas. Com efeito, a 1ª Lei de Kepler, publicada em 1609, postula que a órbita de um planeta é uma elipse com o Sol num dos dois focos. Recorde-se que uma elipse é uma figura geométrica em que a soma das distâncias de qualquer um dos pontos que a

constituem aos focos é constante (figura II.10). Os focos são pontos notáveis da elipse: como se sabe, se prendermos as pontas de um cordel com um alfinete nos focos e com um lápis distendermos o cordel e formos movendo o lápis, a figura resultante desse desenho será uma elipse. O eixo da elipse que passa pelos focos designa-se por eixo maior. Com frequência, em astronomia, designa-se, também, por linha das ápsides[1].
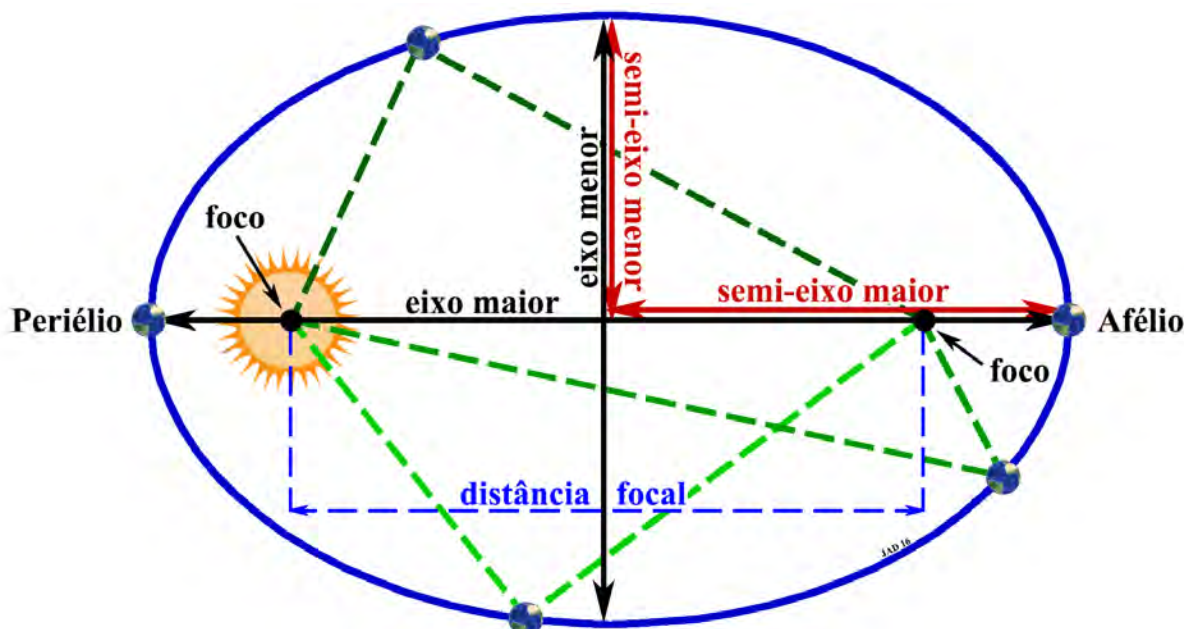
Figura II.10 – Características principais da elipse. O Sol localiza-se num dos focos. O somatório das distâncias entre qualquer ponto da elipse aos dois focos é sempre constante (exemplificado pelos tracejados verdes com distintas tonalidades. O semi-eixo maior não varia com a excentricidade e é igual à distância média do planeta ao Sol.

O eixo que lhe é perpendicular e passa pelo centro da elipse chama-se eixo menor. O semi-eixo maior é o segmento de recta entre a elipse e o centro, que passa por um dos focos. Este semi-eixo maior mantém-se constante quando a excentricidade varia (o que muda é o semi-eixo menor). A 3ª Lei de Kepler postula que o quadrado do período orbital (de forma simples, a duração do ano) é proporcional ao cubo do semi-eixo maior. Como este se mantém constante, tal significa que o período orbital é sempre o mesmo, independentemente da excentricidade da órbita. O comprimento do semi-eixo maior é, também, igual à distância média do planeta ao Sol.

II.4.6.1. Causas

Se a Terra fosse o único planeta a orbitar o Sol, a excentricidade da órbita seria quase nula, ou seja, o nosso planeta descreveria uma circunferência quase perfeita em torno da estrela central. Na realidade, não seria uma circunferência perfeita porque há outros factores intervenientes, designadamente o facto do Sol e da Terra constituírem, em si, um sistema. Cada um destes corpos, com a sua massa, exerce atracção gravítica sobre o outro. Se as

---

[1] Ápsides, em astronomia, são os dois pontos extremos da órbita de um corpo celeste. O termo provém do grego antigo ἁψίς [apsís] = "arco", "abóbada", cujo plural é ἁψίδες [apsídes], através do latim *apsis*. São, portanto, os pontos da órbita localizados mais próximo e mais longe do foco da órbita, designados, respectivamente, por periápside (grego antigo περί [perí] = "próximo" + *apsis*) e apoápside (do grego antigo ἀπό [apo] = "distante", "longínquo" + *apsis*). No caso de planetas girando em torno do Sol, a periápside corresponde ao periélio e a apoápside ao afélio.

massas fossem iguais, no ponto situado a meia distância entre eles o valor da gravidade seria nulo, ou seja, as atracões gravíticas anular-se-iam mutuamente. Podemos imaginar esta situação através de um exemplo simplista: se pegarmos numa régua e colocarmos o dedo exactamente no meio, a régua ficará equilibrada no nosso dedo. Porém, o Sol tem uma massa muito maior do que a da Terra, pelo que o ponto referido, designado por centro de massa ou baricentro[1], está situado muito mais próximo do Sol. Retornando ao nosso exemplo, se quisermos equilibrar um martelo num dedo, teremos que colocar o dedo muito próximo da massa metálica; se colocarmos o dedo a suportar a cabeça do martelo, ele desequilibrar-se-á, pois que o centro de massa se situa perto, mas não propriamente no local onde se concentra a maior massa, pois que o cabo tem, também, a sua massa própria.

Portanto, em rigor, se a Terra gira em torno do Sol, este também gira um pouquinho em torno do planeta, ou seja, ambos giram em torno do centro de massa (baricentro) do sistema. Todavia, como a massa do Sol é cerca de 333 000 vezes maior do que a massa da Terra, o baricentro localiza-se geralmente dentro da esfera solar, mas não no seu centro. Isso bastaria para fazer com que a órbita de translação da Terra, mesmo que não existissem outros planetas, não fosse perfeitamente circular. Porém, existem outros planetas, o que faz com que o sistema seja complexo. Basta ter em consideração os maiores planetas, Júpiter com massa mais de 317 vezes superior à da Terra, e Saturno, cuja massa é cerca de 95 vezes a do nosso planeta, para podermos concluir que as suas influências na órbita da Terra são também determinantes. Os outros planetas também influenciam, logicamente, a órbita terrestre, como é o caso de Urano (com massa 14,6 vezes a da Terra) e Neptuno (com massa 17,2 vezes a da Terra). Mesmo os planetas mais pequenos, como Marte (cuja massa é de aproximadamente um décimo da da Terra) ou Vénus (com cerca de quatro quintos da massa da Terra), provocam alterações na órbita terrestre, pois que estão mais próximos do nosso planeta: a influência é maior quando, nas suas translações, as distâncias à Terra se tornam menores, esbatendo essa influência quando se encontram em oposição (isto é, quando esses planetas se localizam, relativamente ao Sol, no lado contrário ao da Terra). Aliás, esta influência da posição dos planetas na órbita da Terra faz-se sentir, obviamente, com todos os planetas, embora as interferências causadas pelos planetas maiores (Júpiter e Saturno) sejam, como se disse, mais determinantes.

Com efeito, a Lei da Gravitação Universal, formulada por Newton em 1687, diz-nos que dois corpos se atraem mutuamente com uma intensidade que é directamente proporcional ao produto de suas massas e inversamente proporcional ao quadrado da distância que as separa, ou, em linguagem matemática, $F = G (m_1 * m_2 / r^2)$, onde G é a constante da gravitação universal, m_1 e m_2 são as massas desses corpos e r é a distância que os separa. Apesar de, por exemplo, a distância média entre Júpiter e a Terra ser muito grande (variando entre 4,2 e 6,2 unidades astronómicas[2]), a grande massa daquele planeta perturba de forma bastante significativa a órbita da Terra, principalmente quando os dois planetas se encontram mais perto um do outro. Embora a distância entre a Terra e Marte seja muito menor (entre 0,36 e 1,5 unidades astronómicas), a pequena massa deste faz com que as perturbações por ele

---

[1] O termo baricentro vem do grego antigo βαρύς [varýs] = "pesado" + κέντρον [kéntron] = "centro". Em linguagem simplista é o ponto onde os pesos (força gravitacional exercida num objecto por outro) de duas ou mais massas maciças se anulam. É o único ponto onde, se aí for aplicada uma força, esta faz com que o sistema se desloque sem haver rotação. Em todos os outros pontos, a aplicação de uma força provoca, também, rotação do sistema.

[2] "Unidade Astronómica" é uma unidade de comprimento aproximadamente igual à distância média entre a Terra e o Sol. É bastante utilizada em astronomia planetária. De acordo com a definição efectuada pela União Astronómica Internacional em 2012, é igual a 149 597 870 700 m, isto é, aproximadamente 150 milhões de quilómetros.

exercidas na órbita do nosso planeta sejam bastante mais pequenas do que as provocadas por Júpiter.

Com todos os planetas a orbitar o Sol, cada um com o seu próprio período de translação, a sua influência global na órbita da Terra está constantemente a variar. Essa influência será máxima em ocasiões em que todos os planetas se encontrarem alinhados, o que é raríssimo acontecer. Todavia, se entendermos alinhamento por disposição de todos planetas num determinado ângulo, essas situações acontecem com alguma frequência. De acordo com cálculos efectuados pelo *National Solar Observatory* em *Sacramento Peak*, no Novo México, todos os planetas, de Mercúrio a Neptuno, estiveram mais ou menos alinhados (contidos num ângulo de 16,8º) em 20 de Junho de 3 502 a.C. No futuro, voltarão a ficar mais ou menos alinhados (num ângulo de 25,1º) em 20 de Março de 2 673.

Todavia, embora a influência que os outros planetas exercem na órbita terrestre seja significativa, contribuindo para que esta seja excêntrica, em termos comparativos com a que é exercida pelo Sol e pela Lua essa influência é muito pequena. Com base em cálculos efectuados em 2013 por Christopher S. Baird, podemos concluir que a influência de Júpiter quando está mais próximo da Terra é apenas de 0,006% da exercida pelo Sol no periélio. As atracções dos outros planetas, nas posições mais próximas da Terra, são ainda menores. Por exemplo: Vénus – 0,0036%; Saturno – 0,0004%; Marte - 0,0002%. A Lua, quando se aproxima mais da Terra, exerce atracção gravitacional muito maior (0,64% da do Sol) do que a de todos os planetas juntos, embora tal influência não se reflicta, de forma significativa, na excentricidade da órbita terrestre.

É devido a estas interacções gravitacionais que a órbita de translação terrestre é, apenas, ligeiramente elíptica, pouco se afastando da órbita circular (figura II.11). Na realidade, ao longo do tempo, a órbita do nosso planeta varia entre quase circular (e = 0,005) e levemente elíptica (e = 0,0679), dependendo da localização relativa dos outros planetas. Actualmente, a excentricidade da órbita da Terra tem um valor de cerca de 0,0174, ou seja, é aproximadamente circular, havendo uma diferença de apenas 3% entre as distâncias ao Sol no periélio e no afélio. Quando a excentricidade é máxima, essa diferença pode atingir valores da ordem de 15% ou, mesmo, 20%. Apesar da variação da excentricidade ser muito pequena, tem influência climática relevante.

É, também, devido às diversas influências aludidas que não há uma periodicidade bem estabelecida para a excentricidade da órbita terrestre. Em rigor, cada um dos planetas exerce influência na excentricidade da órbita, estabelecendo um período próprio. A situação é ainda mais complicada, pois que as interacções gravitacionais entre os outros planetas acabam por gerar, também, perturbações com periodicidades específicas. Porém, a maioria dessas influências na excentricidade da órbita terrestre tem pequena amplitude. As principais interacções gravitacionais são, como se aludiu, as que decorrem de Júpiter e, depois, de Vénus. A resultante de todas estas interacções parece definir dois períodos mais importantes: um com cerca de 100 000 anos, e outro de aproximadamente 400 000 anos (figura II.12).
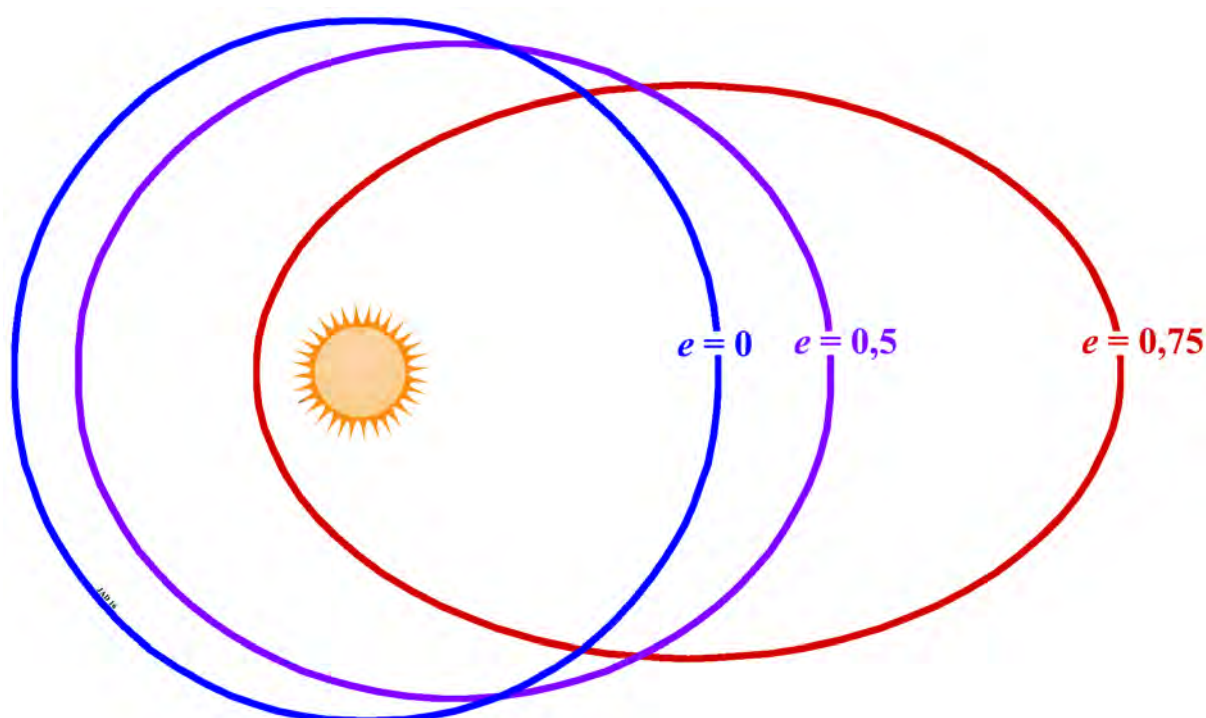
Figura II.11 – Órbitas circular e elípticas com excentricidade (*e*) de 0, 0,5 e 0,75. A excentricidade da órbita da Terra atinge valores máximos inferiores a 0,07 pelo que é quase circular.
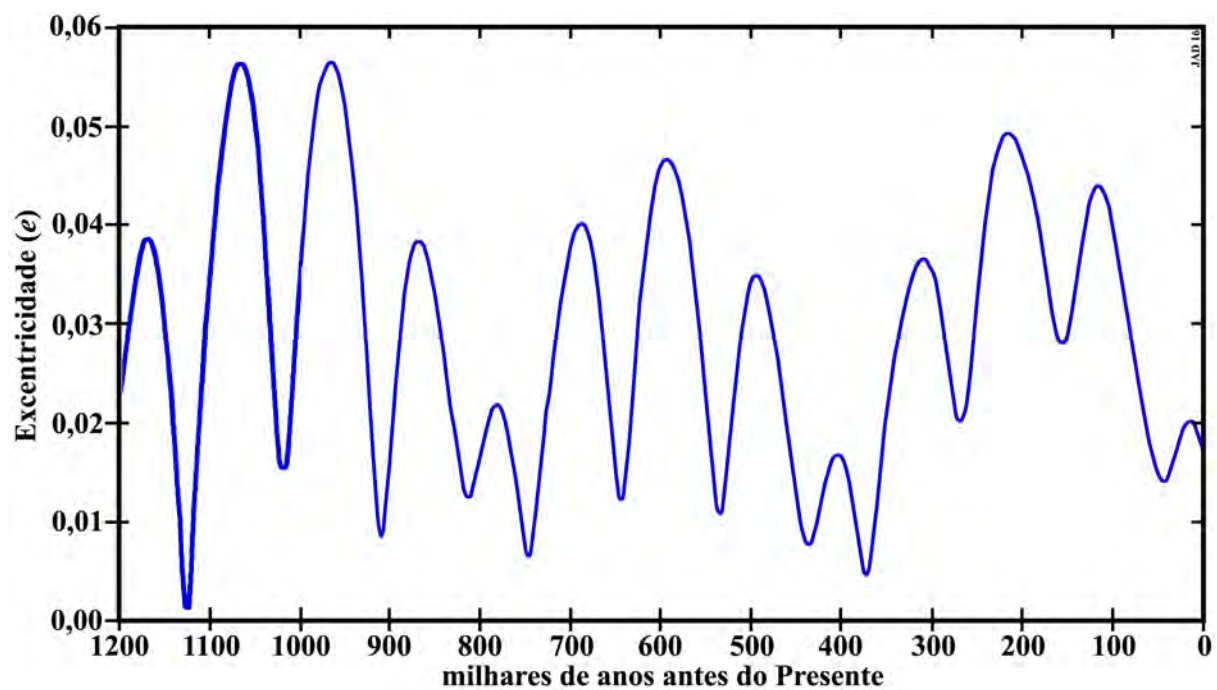
Figura II.12 – Variação da excentricidade (*e*) da órbita da Terra nos últimos milhão e duzentos mil anos.

II.4.6.2. Consequências

A variação da excentricidade da órbita terrestre tem como consequência a modificação da quantidade total de energia radiante que chega à Terra. Tal não é directamente causado apenas pelas diferenças entre o periélio e o afélio. Para compreendermos melhor o assunto temos de recorrer à 2ª Lei de Kepler, formulada pelo astrónomo alemão Johannes Kepler (1571-1630) em 1609, que diz que um segmento de recta que une um planeta e o Sol varre áreas iguais durante intervalos de tempo iguais (figura II.13). Na realidade é a conservação do momento angular. Tal significa que a Terra, quando está mais próxima do Sol, se desloca mais rapidamente, movendo-se mais lentamente quando está mais afastada. Como a quantidade de energia recebida é função da distância ao Sol (a insolação é proporcional ao inverso do quadrado da distância), e a Terra se desloca mais rapidamente quando está mais perto daquele e mais lentamente quando está mais longe, acaba por estar menos tempo recebendo maior energia solar e mais tempo quando essa energia é menor. O resultado é que a insolação total recebida pelo planeta é menor do que quando este tem órbita mais circular. Quando a órbita é circular, a média anual da radiação solar total que chega à parte superior da atmosfera é de cerca de 1 373 W/m^2. Com a actual excentricidade da órbita (perto de 0,016) essa radiação média é de, aproximadamente, 1 366 W/m*2*, isto é, em média, relativamente à órbita circular, há menos 7 watts que chegam a cada metro quadrado do topo da atmosfera. Com órbita mais elíptica, por exemplo, com excentricidade 0,0607, cada metro quadrado aludido receberá menos cerca de 25 watts. Se tivermos em consideração que a área da superfície terrestre é superior a 500 mil milhões de metros quadrados, as variações da insolação com a excentricidade são muito significativas.
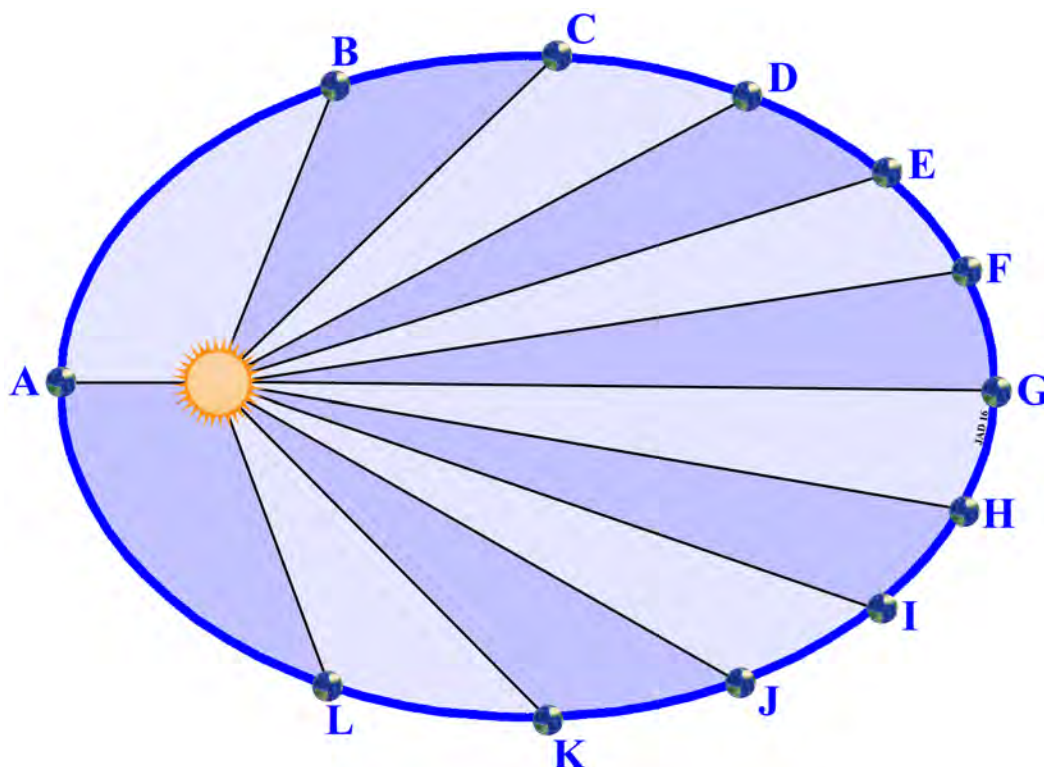
Figura II.13 – Ilustração da 2ª lei de Kepler. Os espaços grosseiramente triangulares representados a azul mais escuro e mais claro têm áreas iguais. De acordo com esta Lei, um planeta, neste caso a Terra, demora o mesmo tempo a deslocar-se de A para B, de B para C e assim sucessivamente, de onde se conclui que a velocidade será maior no trajecto A-B e menor no F-G. Para facilidade de compreensão exageraram-se muito as proporções relativas. A elipse da figura tem excentricidade 0,75, enquanto a actual é de cerca de 0,016.

A mecânica orbital requer, através da 2ª Lei de Kepler, que a duração das estações seja proporcional às áreas dos quadrantes sazonais, de modo que, quando a excentricidade é maior, a duração das estações fica mais contrastada, com maiores durações das estações que ocorrem do lado do afélio, e menores nas que se verificam do lado do periélio. Na situação actual, em que a excentricidade é pequena (0.016), o Outono e Inverno ocorrem, no hemisfério norte, quando a Terra está mais próxima do Sol e, por consequência, quando se desloca a maior velocidade. Por essa razão, as estações aludidas são ligeiramente mais curtas do que a Primavera e o Verão (quando a Terra se desloca com menor velocidade). Com efeito, o Verão no hemisfério norte é 4,66 dias mais longo do que o Inverno, e a Primavera tem mais 2,9 dias do que o Outono. Como é evidente, no hemisfério sul a situação é inversa. Estas diferenças, quando a excentricidade é maior, são, como é evidente, bastante mais contrastadas.

Ao analisarmos os efeitos da excentricidade e a forma como a duração das estações do ano é alterada devido ao movimento não uniforme da Terra por ela induzido, é preciso termos em atenção, também, a precessão do eixo de rotação. Quando as ápsides da Terra estão alinhadas com os equinócios (ou seja, quando estes coincidem com o periélio e o afélio), a duração da Primavera e do Verão (em conjunto) é igual à do Outono e Inverno (em conjunto). Pelo contrário, quando as ápsides estão alinhadas com os solstícios, a duração da Primavera + Verão será máxima e a do Outono + Inverno será mínima (ou o inverso, dependendo da orientação do eixo de rotação).

Quando a órbita terrestre é mais elíptica, ocorrem, portanto, no hemisfério norte ou sul (dependendo da orientação do eixo) Verões muito quentes e Invernos bastante frios, com maior probabilidade de congelamento de corpos hídricos localizados a latitudes elevadas. No hemisfério oposto, os Verões são, pelo contrário, frescos e os Invernos amenos. Nestas situações de maior excentricidade da órbita (da ordem de 0,0679), a diferença entre a quantidade de radiação solar recebida pela Terra no periélio e no afélio pode atingir valores que se aproximam dos 30%.

Como se viu, a excentricidade orbital da Terra faz variar a quantidade de energia radiante solar por ela recebida, bem como amplia ou atenua as diferenças hemisféricas devidas às desiguais quantidades de radiação que atingem cada um dos hemisférios. As consequências, no clima, são evidentes. Todavia, como quase tudo o que se refere ao clima, as coisas não são simples nem lineares. Há que ter em consideração os outros movimentos da Terra, e também os factores endógenos, inerentes ao próprio planeta.

Na situação actual, verifica-se que a Terra, como um todo é, na realidade, um pouco mais quente do que seria de esperar, pois que está um tanto mais distante do Sol. Tal é devido, entre outras causas, à actual configuração dos continentes e dos oceanos. Como já antes foi referido, a parte emersa dos continentes aquece mais rapidamente do que o mar, e arrefece, também, mais rapidamente. Por outras palavras, a inércia térmica do oceano é maior do que a dos continentes. Nos nossos tempos, existe maior aglomeração de continentes no hemisfério norte, e maior dominância de água no hemisfério sul. Por consequência, qualquer intensificação relevante dos Invernos e dos Verões no hemisfério sul (tornando-se respectivamente mais frios ou mais quentes) devido à excentricidade da órbita da Terra, tende a ser compensada pela grande abundância de água existente neste hemisfério. Refira-se que, quando recuamos no tempo, até épocas em que a configuração dos continentes e dos oceanos era diferente, esse efeito tendencialmente compensatório não existia ou processava-se de forma bastante diferente. Este assunto será pormenorizado mais à frente, na parte III.

II.5. Movimentos da Terra e glaciações

II.5.1. Pequeno historial das teorias sobre o assunto

Durante muito tempo, até, pelo menos, quase metade do século XX, as causas das glaciações plistocénicas constituíram mistério científico para o qual dificilmente se conseguiria arranjar uma solução. Têm sido elaboradas múltiplas hipóteses sobre o assunto, umas invocando factores externos ao sistema climático terrestre, outras baseando-se em elementos internos do sistema. Referem-se, como exemplo das primeiras, as que recorrem a mudanças da energia radiante emitida pelo Sol, a alterações da quantidade energia solar que chega à Terra devido a poeira espaciais, e a variações da distribuição sazonal e latitudinal da radiação que atinge o planeta devidas a mudanças na geometria orbital da Terra. Como exemplos das segundas hipóteses aludem-se as que recorrem a alterações do campo magnético da Terra, a flutuações dos teores de poeiras vulcânicas na atmosfera, a variações das concentrações atmosféricas de gases de efeito de estufa, e a mudanças na circulação oceânica superficial e profunda (nomeadamente a circulação termohalina).

Para melhor entendermos a evolução do pensamento sobre as causas das glaciações, devemos recuar até aos séculos XVIII e XIX. Era uma altura em que os intelectuais estavam fortemente condicionados pelos princípios dogmáticos da Igreja, em que a teoria dominante era a do criacionismo ou fixismo (segundo a qual todas as espécies biológicas foram criadas tal como são pelo poder divino, permanecendo imutáveis), e em que não havia uma percepção clara do tempo geológico. Recorde-se que, na altura, a sociedade ocidental continuava fortemente condicionada pelo dogmatismo religioso. Por via de regra, aceitava-se quase como inquestionável a já citada cronologia de base bíblica estabelecida pelo arcebispo irlandês James Ussher (1581 – 1656), segundo a qual a criação do mundo teria ocorrido no dia 23 de Outubro do ano 4004 antes de Cristo. Porém, as ideias iluministas fervilhavam, apelando para o uso da razão, para a utilização do entendimento sem a orientação de outrem. Como escreveu em 1784 o filósofo prussiano Immanuel Kant (1724-1804), *Sapere aude! Tem a coragem de te servires da tua própria razão!* Sectores importantes da intelectualidade coeva tentavam encontrar explicações racionais para o que lhes era dado observar.

Uma das questões enigmáticas era a presença de conchas marinhas no topo de grandes cordilheiras, a altitudes muito elevadas, onde o mar não tinha hipóteses de ter chegado. Outra questão dificilmente explicável era a existência de grandes blocos nos vales das cadeias montanhosas, normalmente apelidados de "blocos erráticos"[1], de que não se conhecia bem qual o mecanismo que teria promovido o seu transporte para esses locais. Se ressaltamos estes dois casos é porque, como veremos, as questões estão intimamente ligadas e ambas relacionadas com a evolução climática.

Sobre os blocos erráticos, as próprias populações locais tinham a percepção de que teriam sido transportados por glaciares no passado, numa altura em que estes eram muito mais vastos e se estendiam até altitudes bastante inferiores, ideia essa que foi sendo absorvida pelos intelectuais que visitavam essas regiões. Perante a vasta disseminação geográfica destes blocos (e de outros indicadores geográficos de zonas que tinham sido glaciadas no passado,

---

[1] Designam-se por blocos erráticos pedras de grandes dimensões que, com frequência, ocorrem em vales glaciários e, muitas vezes, têm litologias diferentes das rochas dessa zona. Correspondem a blocos rochosos que foram sujeitos a transporte glaciário, tendo sido depositados nesses locais quando se verificou a fusão dos gelos. O termo errático provém do latim *erratĭcus*, derivado do verbo *errare* = "errar", vagabundear", tendo, portanto, o significado de "errante", "ambulante", "itinerante".

como as moreias[1]), começou a enraizar-se a percepção de que, em tempos remotos, o clima teria sido mais frio, de modo que teria propiciado a ocupação de áreas muito vastas por glaciares. Em 1837, o naturalista suíço (que migrou para os Estados Unidos da América, em 1847) Jean Louis Rodolphe Agassiz (1807-1873), no seu discurso de abertura do congresso da Sociedade Helvética de História Natural, procedeu a uma síntese dos conhecimentos, apresentando a teoria de que, no passado, houve *grandes mudanças ocasionadas pela descida das temperaturas do nosso globo, em períodos anteriores ao início de nossa época*, acrescentando que *a temperatura da Terra foi mantida, sem quaisquer oscilações consideráveis, durante todo o período de qualquer época geológica, como ocorre na nossa própria época, diminuiu consideravelmente, de repente, no final de cada época*. Na terminologia actual, foi a formulação da existência de períodos glaciários e interglaciários, que se foram repetindo ao longo do tempo, embora Agassiz não propusesse explicitamente qualquer mecanismo causal.

Porém, passados apenas cinco anos, em 1842, o matemático francês Joseph-Alphonse Adhémar (1797-1862) publicou um livro em que ensaiava uma explicação causal dos períodos glaciários propostos por Agassiz, baseando-se nos movimentos da Terra, principalmente a precessão dos equinócios, que era conhecida desde a Antiguidade Clássica, mas que tinha sido pormenorizada alguns anos antes, em 1801, pelo astrónomo alemão (naturalizado inglês) William Herschel (1738-1822). Embora a teoria de Adhémar padeça de graves erros à luz do que hoje conhecemos do sistema climático, teve o mérito de, pela primeira vez, tentar uma explicação unificada para as glaciações e para as "revoluções do mar" (*Révolutions de la Mer*), precisamente como intitulou o seu livro. Na altura, a calote de gelo antárctica era ainda muito mal conhecida, o que levou o autor a avaliar a sua espessura média em mais de 100 quilómetros, e a considerar que o hemisfério sul estaria sujeito a uma glaciação. Com base nisso e no movimento de precessão, responsável pelo facto *da Primavera e o Verão juntos superarem, no nosso hemisfério, em cerca de oito dias, a Primavera e o Verão reunidos do hemisfério oposto*, concluiu *que essa diferença foi suficiente para alterar todos os 10 500 anos, a constituição física de ambos os hemisférios e, portanto, produzir mudanças significativas na superfície do globo*, ou seja, provocar alternadamente glaciações em cada um dos hemisférios. Ainda segundo a teoria de Adhémar, a grande acumulação de gelo junto ao pólo sul (resultado dos longos invernos) teria deslocado o centro de gravidade da Terra, do que teria resultado deslocamento parcial das águas oceânicas. Principalmente nas deglaciações, o autor recorre também às correntes oceânicas globais, realçando a sua importância no transporte de calor do hemisfério sul para o norte, correspondendo a sua descrição a uma versão simplificada do que hoje conhecemos sobre a circulação termohalina. Aliás, refere mesmo que o *nosso hemisfério arrefeceria mais rapidamente se não existisse a Corrente do Golfo* e que *o vapor produzido pelas correntes de água quente iria contribuir para aumentar o gelo polar* (o que viria também a ser defendido, mais de um século mais tarde, em 1979, por paleoclimatologistas como William F. Ruddiman e Andrew McIntyre, do *Lamont-Doherty Geological Observatory*, de New York.

---

[1] Moreias são acumulações não consolidadas de materiais glaciários. Os elementos são heterométricos (de várias dimensões), indo de grandes blocos a siltes e argilas, apresentando, em geral, algum grau de rolamento. Correspondem à acumulação de materiais transportados por glaciares, havendo vários tipos (moreias centrais, de fundo, etc.), entre os quais as moreias frontais, que se depositam na frente glaciária, principalmente devido à fusão do gelo, que marcam os limites até onde o glaciar progrediu, e as moreias laterais, que se acumulam dos lados da massa gelada à medida que esta flui para jusante. O termo provém do francês *moraine*, adaptada da palavra saboiana (franco-provençal) morena = "monte de terra", derivada do provençal *mor*, *morre* = "focinho", "mordaça", "tromba", com origem no latim vulgar *murrum* = "objecto arredondado"

A teoria de Adhémar foi recebida com bastantes criticismos. À medida que os anos iam passando e a quantidade de observações se ia ampliando, tornava-se mais claro que as glaciações eram fenómenos repetitivos que tinham afectado todo o globo. Porém, dadas as insuficiências da teoria de Adhémar, continuava a faltar uma explicação convincente para tais mudanças climáticas abruptas de grande amplitude. Tal viria a ser conseguido pelo climatologista escocês James Croll (1821-1890) que, primeiro em 1864 e, depois, de forma mais completa, em 1875, publicou a sua teoria sobre estas modificações climáticas, a qual tinha como base as diferenças de radiação solar que chega à Terra devido à inclinação axial, à excentricidade da órbita e à precessão. A importância do trabalho de Croll reside na abordagem que efectuou às glaciações, tendo em consideração os efeitos combinados dos aludidos três factores astronómicos principais nas insolações sazonais durante o periélio e o afélio. Os cálculos que efectuou levaram-no a concluir que as fases glaciárias, num ou noutro dos hemisférios, se desenvolvem quando a excentricidade da órbita é maior e quando, simultaneamente, o solstício de Inverno (do hemisfério norte ou sul) ocorre por alturas do afélio. Assim, a precessão dos equinócios teria um papel decisivo no desenvolvimento das glaciações, e a estação crítica para o seu início seria, logicamente, o Inverno. A diminuição na quantidade de luz solar recebida durante esta estação propiciaria Invernos severos, o que favoreceria forte acumulação de neve, que não teria possibilidades de ser fundida durante o curto Verão. O aumento da área abrangida pelos gelos criaria, através de um mecanismo de retro-alimentação devido à alteração do albedo (a que já nos referimos no ponto I.2.2.2), condições para que a área coberta por gelo se fosse progressivamente ampliando. Segundo os cálculos de Croll, estas condições teriam sido atingidas há 240 000 anos e há 80 000 anos.

Embora bem recebida em geral, a teoria de Croll rapidamente começou a ser objecto de alguma contestação, nomeadamente porque, à luz das novas observações geológicas que iam sendo efectuadas, a última glaciação teria terminado há cerca de 10 000 anos, e não há 80 000 anos como era postulado pela aludida teoria. Várias foram as discussões estabelecidas, em finais do século XIX e início do século XX, em torno do assunto, abordando, entre outras, as cronologias das glaciações, a quantidade de calor recebido pelos hemisférios ou em determinadas latitudes durante o ano inteiro ou no Verão e no Inverno, ou refinando os cálculos astronómicos relativos à precessão, à excentricidade e à inclinação axial. Ia-se tornando cada vez mais claro que a teoria astronómica explicativa dos períodos glaciais não se ajustava ao conjunto de observações geológicas que, progressivamente, se ia ampliando e pormenorizando, pelo que era necessário proceder a refinamentos das teorias existentes ou à formulação de novas teorias.

Apenas como exemplo, refere-se que o renomado geólogo Charles Lyell (1797-1875), que na nona edição, de 1853, dos seus famosos "Principles of Geology" (três volumes, inicialmente publicados entre 1930 e 1933), dedicava menos de 60 páginas às questões climáticas, na décima primeira edição (a última publicada em vida), de 1872, atribuía já ao assunto mais de 130 páginas. Para Lyell, a teoria defendida desde a primeira edição, era que as forças motrizes da mudança climática radicavam na distribuição de terras emersas e das áreas oceânicas. Quando aquelas estavam concentradas em latitudes equatoriais e tropicais o clima nas altas latitudes era mais ameno, pois que o excesso de aquecimento devido ao sol equatorial dava origem a correntes de ar quente que acabavam por atenuar as temperaturas nas regiões circumpolares. Por outro lado, quando as terras emersas se distribuíam em torno dos pólos, produzia-se o efeito inverso, pois que não existiam massas terrestres junto ao equador para absorver calor e, portanto, não se geravam ventos quentes que amenizassem o clima nas regiões polares. Na edição de 1872 continuava, na essência, a defender a mesma teoria, ressaltando que as causas astronómicas, por si só, não poderiam explicar a acumulação de gelo nas regiões circumpolares, quando nessas regiões prevaleciam oceanos profundos, além

de que, em períodos em que a excentricidade é maior, o eixo menor da elipse seria encurtado, o que propiciaria maior quantidade de calor solar recebida pela Terra, o que contrairia o desenvolvimento de um período glacial. Portanto, como conclusão, considerava que *as mudanças climáticas passadas e a quantidade de gelo e neve agora armazenados em latitudes polares foram causadas, principalmente, por condições geográficas*.

Em 1895, o geofísico italiano Luigi di Marchi (1857-1937), também estudioso da atmosfera, chegou à conclusão de que nem as teorias astronómicas, nem as geológicas, conseguem explicar convenientemente as glaciações, tendo elaborado, em alternativa, uma teoria meteorológica. De acordo com a análise que efectuou, a temperatura do ar atmosférico depende do balanço energético da Terra, isto é, da relação entre a energia radiante solar recebida e a energia que emite para o espaço. Portanto, *uma pequena modificação na transparência da atmosfera aos raios solares seria suficiente para produzir uma idade do gelo* [glaciação] *nas latitudes altas e médias*. Segundo Marchi, *uma diminuição geral da transparência atmosférica não pode explicar-se senão por efeito da difusão geral na atmosfera, em toda a extensão da Terra, de um gás, ou vapor, ou poeira, que absorva ou reflicta para o espaço uma parte do calor que chega à Terra,* acrescentando que, *para além das condições térmicas já mencionadas, a expansão glacial pressupõe também condições de precipitação extraordinária, e tal pressupõe, por sua vez, condições de humidade e nebulosidade maiores do que as actuais.* O raciocínio levou-o, ainda, a concluir que o *abaixamento da temperatura* [e desenvolvimento da glaciação] *é possivelmente causado mais por diminuição da temperatura de Verão do que pela de Inverno*. Quanto à causa da diminuição da transparência da atmosfera, embora Marchi contemple várias possibilidades, nomeadamente as poeiras vulcânicas, privilegia claramente o vapor de água.

Em 1889, em anexo à obra de Frederick Wright (1838-1921) sobre as glaciações na América do Norte, o geólogo norte-americano Warren Upham (1850-1934), publicou a sua teoria sobre as glaciações causadas por oscilações da crosta terrestre (muito na senda de Charles Lyell): *Resumidamente, a condição e a relação da crosta e interior da Terra parecem ser de tal forma que produzem, em conexão com a contracção da massa terrestre, submergências e emergências de extensas áreas, algumas das quais foram elevadas até alturas em que a precipitação ao longo do ano foi quase totalmente constituída por neve, o que, gradualmente, conduziu à formação de espessas camadas de gelo; mas, com a elevada carga provocada pelo gelo, essas áreas começaram a sofrer subsidência, acompanhada por emergência de outras partes da crosta não glaciadas*, nomeadamente de áreas periféricas às que foram glaciadas. Dito de outra forma, com a carga provocada pela acumulação de gelo, as terras glaciadas são pressionadas para baixo, fazendo com que a crosta terrestre penetre mais na astenosfera; com o desaparecimento do gelo (deglaciação), dá-se a posterior emergência hidrostática devido ao material da astenosfera se deslocar novamente para debaixo da crosta onde se deixou de fazer sentir a carga provocada pelo gelo. É interessante verificar que, já em 1889, quando se pensava que os continentes eram imóveis (pois que a aceitação da deriva continental só se começou a verificar nos anos 60 do século XX), Upham descrevia, embora de forma simples, o que viria a ser considerado, mais de meio século mais tarde, como essencial para perceber os efeitos das glaciações: os movimentos de compensação isostática e os ajustes que as glaciações induzem nas zonas periféricas (*glacial rebound*).

São de referir, também, as teorias que tentavam explicar as glaciações através do efeito de estufa. Na base, não era uma ideia nova, porquanto já o físico e matemático francês Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830), tinha publicado, em 1827, um trabalho em que abordava o balanço energético da Terra e o efeito de estufa atmosférico. Considerando que *o calor primitivo do globo* [que assumimos como o grau geotérmico] *não tem efeito sensível à*

superfície, baseava o seu raciocínio na radiação recebida pela Terra e no que por ela é emitido: esta distinção entre calor luminoso e calor obscuro explica o aumento de temperatura causado por corpos transparentes. A massa de água que cobre grande parte do globo, e os gelos polares, opõem menos obstáculos ao calor luminoso afluente do que o calor obscuro, que retorna no sentido contrário para o espaço exterior. A presença da atmosfera produz um efeito semelhante, acrescentando, mais à frente, que *a transparência das água e a do ar concorrem para aumentar o grau de calor adquirido, pois que o calor luminoso afluente penetra muito mais facilmente no interior da massa, e o calor obscuro sai mais dificilmente seguindo o sentido contrário.* Sem este efeito, a temperatura da Terra seria da ordem dos -18ºC. O assunto viria a ser, posteriormente, mais elaborado por outros autores, nomeadamente em 1838 pelo físico francês Claude Servais Mathias Pouillet (1791-1868). Em 1861, o físico britânico John Tyndall (1820-1893) acabaria por comprovar o poder de absorção de vários gases e, consequentemente, a sua importância para o desenvolvimento do efeito de estufa. Segundo as experiências que efectuou, *a quantidade de vapor de água difuso na atmosfera* (...) pr*oduziu uma absorção pelo menos igual a treze vezes a da atmosfera* e, portanto, devido à grande *influência ser exercida pelo vapor de água, todas as variações deste componente devem produzir mudanças no clima. Observações similares se aplicariam ao ácido carbónico* [H_2CO_3 forma normalmente adquirida pelo CO_2 dissolvido] *difundido no ar, pois que uma mistura quase inapreciável de qualquer dos vapores de hidrocarbonetos produziria grandes efeitos nos raios terrestres e provocariam mudanças correspondentes de clima*. Mais tarde viria a elaborar de forma mais completa sobre o assunto, principalmente em 1872, numa colectânea de trabalhos revistos.

Com base neste conjunto de informações, o físico sueco Svante August Arrhenius (1859-1927) elaborou, em 1896, uma teoria mais coerente sobre o desenvolvimento das glaciações. Partindo do princípio de que *não existe ainda nenhuma hipótese satisfatória que possa explicar como as condições climáticas de uma idade do gelo se poderiam ter alterado em tão pouco tempo como o que se passou desde os dias da época glacial*, Arrhenius enfatizava o papel que *alguns dos gases atmosféricos têm na absorção de consideráveis quantidades de calor*. A retenção de calor pela atmosfera *não é exercida pela massa do ar principal, mas sim, em elevado grau, pelo vapor de água e pelo ácido carbónico, que estão presentes no ar, em pequenas quantidades*. Para o demonstrar, o autor fez *uma estimativa preliminar do efeito provável de uma variação do ácido carbónico atmosférico na temperatura da terra. Esta estimativa levou-me a acreditar que se pode, deste modo, provavelmente encontrar uma explicação para variações de temperatura de 5° a 10°C.* Assim, para se obterem *temperaturas da idade do gelo entre os paralelos 40º e 50º, o ácido carbónico no ar deve descer a valores de 0,62 a 0,55 do seu valor presente (diminuição da temperatura de 4° a 5°C)*.

Entre outros que se dedicaram ao assunto, o tema foi mais elaborado, em 1899, pelo geólogo norte-americano Thomas Chrowder Chamberlin (1843-1928). Segundo este autor, *a quantidade de humidade na atmosfera, sendo as outras coisas iguais, está directamente dependente da temperatura, e a temperatura, por sua vez, depende da quantidade de humidade na atmosfera. Esta dependência recíproca torna o vapor aquoso num factor vacilante, sujeito ao controle de outros factores que aumentem ou diminuam a temperatura atmosférica. Sempre que, por conseguinte, um aumento de dióxido de carbono provoca aumento da temperatura, aumenta também a quantidade de vapor de água e este, pela sua absorção térmica, aumenta ainda mais a temperatura e faz surgir mais vapor, e estas acções e reacções prosseguem, atenuando-se, até que é estabelecido um equilíbrio. Uma diminuição no dióxido de carbono diminui a temperatura e, assim, diminui o vapor de água, o que reduz ainda mais a temperatura, iniciando-se a série inversa de acções e reacções. Portanto, as*

flutuações na quantidade de dióxido de carbono são acompanhadas não simplesmente pelos seus próprios efeitos individuais, mas também pelos efeitos auxiliares. Assim, o dióxido de carbono torna-se, portanto, o factor determinante [de regulação climática]. Chamberlin prossegue o seu texto com a identificação das possíveis fontes e sumidouros, permanentes e temporárias, de dióxido de carbono, concluindo que porventura as mais relevantes são, por um lado, alteração das rochas com intervenção de organismos e, por outro, a formação de conchas calcárias.

II.5.2. Os ciclos de Milankovitch

II.5.2.1. A teoria de Milankovitch

Em 1920, o astrónomo e matemático sérvio Milutin Milanković (afrancesado para Milankovitch) (1879-1958), publicou o primeiro de uma série de trabalhos, que viriam a ter o seu expoente em 1941 (e que viria a ser traduzido para inglês em 1969), em que apresentou uma teoria astronómica completa para as glaciações plistocénicas recorrendo aos dados astronómicos disponíveis para calcular as variações na insolação e consequentes alterações climáticas. No seu trabalho, determinou com grande detalhe matemático a radiação solar em diferentes latitudes e épocas, utilizando estes dados para calcular o balanço energético do planeta, tendo em consideração o albedo e a reemissão de energia para o espaço na banda dos infravermelhos. Uma das conclusões importantes a que chegou foi a de que, para se desenvolver uma glaciação, o Verão nas altas latitudes do Norte deve ser suficientemente frio para impedir a fusão total da neve que se acumulou durante o inverno (ao contrário do que por vezes era defendido, que eram os invernos longos, frios e rigorosos que iniciavam as glaciações). Não havendo no Verão fusão completa das neves, no Inverno seguinte a área coberta por neve e gelo amplia-se, iniciando-se um mecanismo de retro-alimentação positiva, em que o progressivo aumento da superfície branca gelada amplia o albedo (sendo o calor solar reflectido e havendo, portanto, pouco aquecimento da área), criando-se condições para que essas superfícies geladas se ampliem ainda mais.

Na base, o trabalho de Milankovitch assenta não em cada um dos movimentos da Terra (excentricidade da órbita, precessão do eixo de rotação e inclinação axial) que, porém, considera como estruturantes, mas sim nas consequências conjuntas que induzem na insolação recebida latitudinalmente pelo planeta. Por essa razão, introduz um novo conceito, o das "estações calóricas", correspondentes a meio ano. Assim, o Verão calórico corresponde à metade do ano em que, em todos os dias, é recebida mais radiação solar do que em qualquer um do Inverno calórico. Evitam-se, assim, as variações da duração das estações astronómicas. Com efeito, como já foi referido no ponto II.1.6.2, na situação actual, no hemisfério norte, o Verão e a Primavera em conjunto duram mais cerca de oito dias do que o Outono e o Inverno juntos. O recurso às estações calóricas, que têm a mesma duração em qualquer situação (embora os inícios e finais vão variando com o tempo), permite contornar esse óbice.

A curva de insolação apresentada por Milankovitch tem boa correlação com os períodos glaciários (figura II.14). Decorrente da abordagem efectuada por este investigador conclui-se que se estabelecem condições propícias ao desenvolvimento de uma glaciação no hemisfério norte principalmente quando se verifica a conjugação de três condições: a estação quente se inicia no afélio (ou seja, quando a Terra, ao descrever a sua órbita, se localiza mais afastada do Sol); a excentricidade é máxima (isto é, quando no afélio a Terra está o mais longe possível do Sol); e a obliquidade axial é mínima (o que significa que as diferenças entre o Verão e o Inverno são mais pequenas e os contrastes latitudinais são maiores).
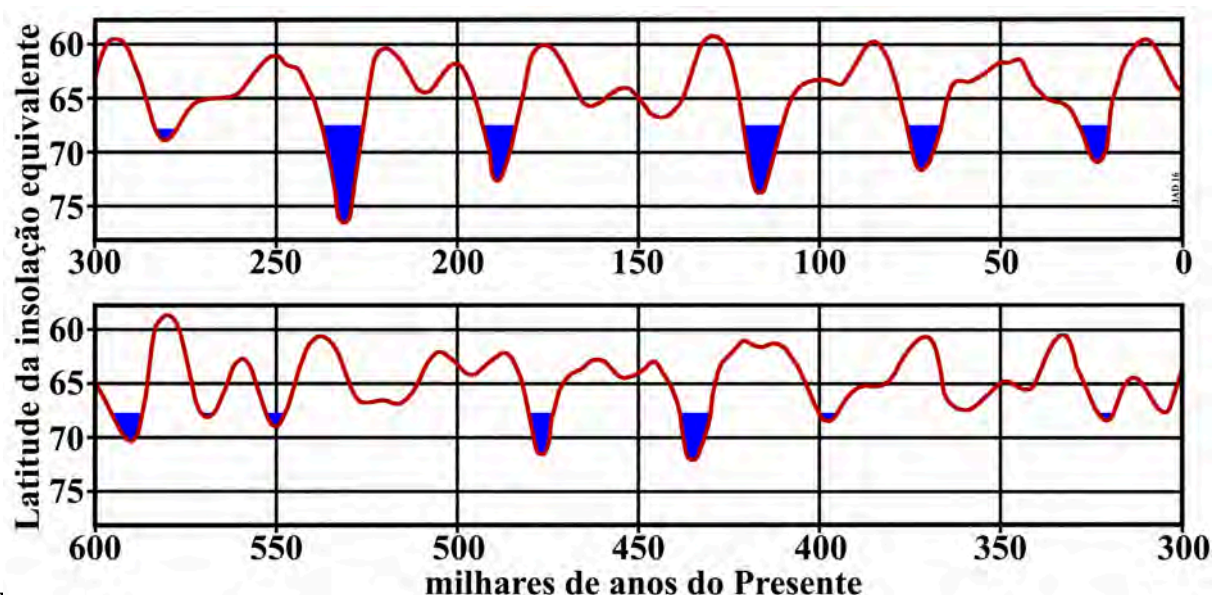
Figura II.14 – Curva de insolação nos últimos 600 milhares de anos apresentada por Milankovitch em 1941. Os períodos realçados a azul indicam condições propícias ao desenvolvimento de glaciações.

Apesar da teoria de Milankovitch ter sido bem recebida por vastos sectores da comunidade científica, não foi preciso que passasse muito tempo até começarem a ser apontadas inadequações entre a sua curva de insolação e o que era possível deduzir das observações geológicas referentes às glaciações. Numa análise retrospectiva, chega-se à conclusão de que tais contestações derivavam essencialmente de dois factores: registos geológicos fragmentários que conduziam a imprecisões cronológicas no estabelecimento da ocorrência das glaciações; e a métodos de datação que não tinham grande precisão temporal. Por outro lado, a curva de insolação revelava variações de insolação entre as estações calóricas inferiores a 5% das que existem actualmente, o que era considerado insuficiente para induzir grandes mudanças climáticas, pois que, em geral, se partia do princípio que o clima era bastante resiliente e, portanto, incapaz de reagir a essas pequenas variações. Sabe-se hoje que a resiliência de clima é, em muitas situações, pequena, podendo reagir rapidamente, com magnitude considerável, a pequenas variações da insolação (nomeadamente pelas alterações que podem induzir noutros factores endógenos do clima terrestre). Por outro lado, não obstante as estações calóricas definidas por Milankovitch serem de grande importância, veio a verificar-se mais tarde que acabam por mascarar as variações da insolação mensais e, mesmo, diárias, que podem ter, também, grande importância. Por exemplo, o climatologista belga André Léon Berger (1942-...) demonstrou, em 1978, que as variações mensais de insolação podem atingir 12% e, portanto, bastante mais do que os 5% associados às estações calóricas.

II.5.2.2. Ampliação dos conhecimentos e novo reconhecimento da teoria

Apesar dos vários trabalhos sobre o assunto que foram sendo produzidos por Milankovitch, progressivamente foi-se ampliando o sector da comunidade científica que levantava objecções à teoria. Entretanto, ocorreu a 2ª Guerra Mundial (1939-1945). Após o conflito, as tecnologias que tinham sido desenvolvidas ou aperfeiçoadas com objectivos bélicos, foram sendo disponibilizadas, a pouco e pouco, para a sociedade civil, nomeadamente para a comunidade científica. O progresso científico daí decorrente foi verdadeiramente notável. Com essas novas tecnologias, iniciou-se o período de grande reconhecimento do oceano mundial. Os resultados obtidos impuseram a aceitação geral da teoria da deriva continental. Por outro lado, a análise dos indícios glaciários deixou de estar restrita ao território emerso, passando a ser

intensivamente estudados no domínio submerso, nomeadamente através técnicas batimétricas mais precisas, de sonares de pesquisa lateral (*side scan sonars*) e de reflexão sísmica, que permitiam cartografar os fundos marinhos com grande detalhe. O recurso a novos colhedores que começaram a permitir extrair dos fundos marinhos secções longas dos sedimentos aí acumulados ao longo do tempo, constituiu, de igual modo, um avanço notável. A este propósito é de recordar que as sequências estratigráficas (sucessões de estratos ou camadas sedimentares) estão, com frequência, truncadas em terra devido a episódios de erosão, enquanto nos fundos marinhos a probabilidade de encontrar sucessões ininterruptas é muito maior. Como os glaciares transportam cargas sólidas consideráveis (fragmentos de rochas, sedimentos grosseiros, partículas finas, etc.), que são obviamente incorporados nos icebergs quando aqueles chegam ao mar, e como, à medida que o gelo se funde essa carga sólida é libertada e cai para o fundo, sendo integrada nos sedimentos, a análise das colunas sedimentares do fundo marinho permite estabelecer com grande precisão a sucessão de períodos glaciários e interglaciários.

Após a 2ª Guerra Mundial verificou-se, também, notável progresso nos métodos de datação, o que, em conjunto com as técnicas acima aludidas, veio a permitir estabelecer um quadro cronológico bastante mais preciso para as glaciações. Um dos grandes avanços neste aspecto foi a descoberta, em 1940 (mas publicada em 1941), da utilização do Carbono 14 (^{14}C) como método de datação radiométrico, efectuada pelo físico norte-americano Samuel Ruben (1913-1943) e pelo químico canadiano (posteriormente naturalizado norte-americano) Martin David Kamen (1913-2002), que trabalhavam na Universidade da Califórnia em Berkeley. O método viria a ser aperfeiçoado nos anos seguintes, nomeadamente pelos químicos estadunidense James Richard Arnold (1923-2012) e Willard Frank Libby (1908-1980), da Universidade de Chicago, que determinaram com maior precisão o período de semi-vida deste isótopo. Rapidamente o método do ^{14}C se transformou numa das formas mais adoptadas de datar materiais geológicos, biológicos, arqueológicos e outros com idades inferiores a cerca de 60 000 anos. Entretanto, principalmente na segunda metade do século XX, vários outros métodos radiométricos de datação foram desenvolvidos e aperfeiçoados, permitindo obter datações muito mais rigorosas do que até aí era possível.

Também de grande importância foi a descoberta, no início da 2ª metade do século XX, pelo micropaleontólogo italiano (posteriormente naturalizado norte-americano) Cesare Emiliani (1922-1995), da utilização dos isótopos estáveis de oxigénio de carapaças de organismos marinhos, principalmente de foraminíferos[1], para definir determinados parâmetros ambientais, principalmente como proxy da temperatura da água. A base do método é a determinação das razões dos isótopos de oxigénio 18 (^{18}O) e oxigénio 16 (^{16}O), razão que é conhecida por $\delta^{18}O$ [delta O-18]. Como a abundância do ^{18}O é muitíssimo maior do que a do ^{16}O (na atmosfera,

---

[1] Os foraminíferos constituem um grande grupo de protistas (organismos eucariontes, isto é, que têm núcleo celular rodeado por uma membrana), dotados de uma concha (ou teca) que pode conter uma ou mais câmaras, todas ligadas por uma pequena abertura chamada "foramen". Normalmente a teca tem composição carbonatada (calcite ou aragonite), mas nalgumas espécies é constituída por partículas do meio aglutinadas ou por um invólucro de natureza orgânica (proteica ou quitinosa). Normalmente são menores do que 1 mm, embora alguns, raros (os macroforaminíferos), possam atingir dimensões de vários centímetros. Entre fósseis e actuais conhecem-se mais 275 mil espécies, datando as mais antigas do Pré-Câmbrico. A maior parte das espécies é marinha, embora várias sejam típicas de águas salobras, distribuindo-se desde as zonas costeiras até às planícies abissais e, mesmo, fossas abissais, desde as zonas equatoriais às polares. A grande maioria das espécies é bentónica (vive no fundo do meio hídrico), mas muitas são planctónicas (vivem à ou perto da superfície). Constituem excelentes indicadores ambientais. O termo foraminífero deriva do latim tardio, sendo composto por *forāmen* = "orifício", "abertura", "buraco" + o sufixo *–fer*, derivado do verbo *ferre* = "transportar", "usar", "suportar", significando, portanto, que tem orifícios (o foramen e os poros da teca).

em média, 99,76% do oxigénio corresponde a ^{18}O e apenas 0,04% a ^{16}O, sendo os restantes 0,20% do outro isótopo estável, o ^{17}O), o $\delta^{18}O$ é determinado em permilagens, determinando as razões isotópicas na amostra em análise e numa amostra padrão, utilizando a fórmula $\delta^{18}O = [(^{18}O/^{16}O)_{amostra} / (^{18}O/^{16}O)_{padrão} - 1] * 1000‰$. Em 1953, S. Epstein e colegas estimaram que um acréscimo de 0.22‰ no valor do $\delta^{18}O$ seria equivalente a um arrefecimento de cerca de 1ºC (não tendo em consideração outros efeitos, como as variações do volume de gelo e de salinidade). Posteriormente, o método foi bastante mais aperfeiçoado, continuando a sê-lo actualmente.

De forma muito simplificada, a base do método é a que a seguir se descreve. Quando a água do mar se evapora, o oxigénio dessa água é preferencialmente ^{16}O, pois que este isótopo é mais leve. A água oceânica fica, por consequência, enriquecida em ^{18}O, mais pesado. Porém, a chuva faz com que o ^{16}O retorne ao oceano. Durante as glaciações, muita da água evaporada do oceano (portanto com mais ^{16}O) não retorna ao oceano, acumulando-se, sob forma de neve e gelo, nas zonas glaciadas. Tal faz com que a água oceânica fique enriquecida em ^{18}O, ou seja, fica com um $\delta^{18}O$ maior. Quando se dá a glaciação, com a fusão dos gelos, a água enriquecida em ^{16}O retorna ao oceano, fazendo com que o $\delta^{18}O$ diminua. Como a maior parte dos microorganismos forma as suas carapaças calcárias ($CaCO_3$) a partir de elementos presentes na água do mar, integram, neste processo, os isótopos de oxigénio na proporção em que eles existem no meio em que vivem. As carapaças mais utilizadas em estudos de paleoclimatologia são as dos foraminíferos, que são muito abundantes e têm períodos de vida curtos. Assim, analisando os $\delta^{18}O$ dessas carapaças que se encontram integradas nos sedimentos, é possível fazer a reconstituição da evolução climática (figura II.15), utilizando esses dados, inclusivamente, como indicadores do volume de gelo e da temperatura da água.

Em consequência dos avanços tecnológicos e científicos verificados após a 2ª Guerra Mundial, os conhecimentos sobre a evolução climática de médio a longo prazo expandiram-se extraordinariamente, nomeadamente no que se refere às glaciações. Por exemplo, o estudo de testemunhos longos de sedimentos colhidos nos fundos oceânicos permitiu traçar um quadro evolutivo bastante mais preciso, não só devido à aplicação das novas técnicas analíticas acima aludidas, mas também porque os novos métodos de datação eram muito mais rigorosos. Por outro lado, foram surgindo trabalhos que actualizavam e refinavam os cálculos e a teoria de Milankovitch, apresentando novas propostas de como os movimentos relacionados com a excentricidade da órbita, a precessão e a inclinação do eixo podem afectar o clima da Terra.

Esses novos conhecimentos, de forma geral, ajustavam-se á teoria de Milankovitch, pelo que, progressivamente, se verificou, de novo, grande aceitação desta hipótese astronómica, principalmente a partir dos anos 70 do século XX. Expressões como "parâmetros de Milankovitch" e "ciclos de Milankovitch" começam a surgir intensivamente na bibliografia científica. Embora haja alguma confusão entre estas duas expressões, a primeira refere-se especificamente aos movimentos de excentricidade, de obliquidade e de precessão, enquanto a segunda traduz os efeitos desses movimentos na insolação. Como se referiu, muitos foram os resultados científicos que conduziram à reabilitação e aceitação generalizada da teoria de Milankovitch, entre os quais ressaltam os obtidos com o projecto CLIMAP (acrónimo de *Climate: Long range Investigation, Mapping, and Prediction*), desenvolvido nos anos 70 e 80 do século passado, e financiado pela *National Science Foundation* no âmbito da Década Internacional dos Oceanos, e centrado no último máximo glaciário.
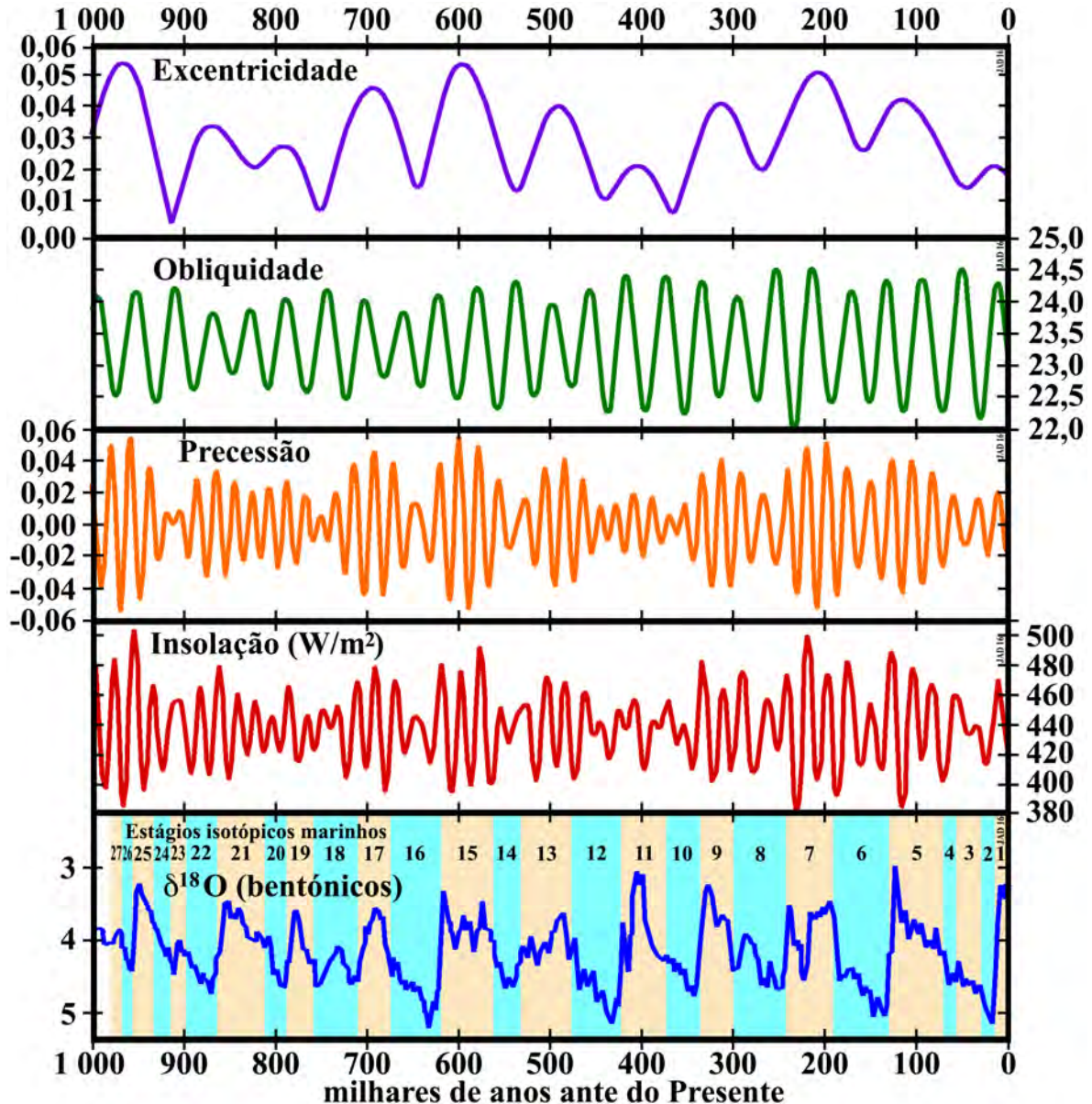
Figura II.15 – variações da excentricidade, da obliquidade, da precessão, da insolação (a 65ºN) e do δ^{18}O de foraminíferos bentónicos no último milhão de anos.

Com a evolução tecnológica verificada nas últimas décadas do século XX, nomeadamente as relacionadas com a informática, foi possível realizar com muito mais facilidade e celeridade os complexos cálculos associados à teoria. Assim, verificou-se rápido progresso nesta matéria, sendo de enfatizar, principalmente, dois aspectos: a) a evolução da insolação (global, hemisférica e latitudinal, bem como sazonal, mensal e mesmo diária) nas últimas centenas de milhares de anos, que foi sendo estabelecida cada vez com maior precisão, beneficiando, também, da maior exactidão com que passaram a ser determinados os parâmetros astronómicos; b) a evolução do clima (em quase todos os aspectos) nas últimas centenas de milhares de anos, propiciada por forte ampliação de dados provenientes de proxies dotados de melhores calibrações, e pelo desenvolvimento de modelos climáticos progressivamente mais abrangentes (e complexos). A teoria de Milankovitch foi sendo, assim, gradualmente aperfeiçoada.

II.5.3. A ciência actual e os ciclos de Milankovitch

Actualmente, a comunidade científica em geral aceita a importância determinante que os ciclos de Milankovitch (nas versões que foram produzidas a partir das últimas décadas do século XX) têm para a evolução climática. Decorrente das novas soluções analíticas astronómicas que foram sendo apresentadas desde início da segunda metade do século XX, as variações da curva de insolação são agora conhecidas com muito mais pormenor do que acontecia no tempo em que Milankovitch formulou a teoria. Porém, existe a convicção generalizada de que, embora determinantes, os movimentos astronómicos não podem explicar, só por si, toda a evolução climática. Outros factores, endógenos, podem ser também determinantes, como sejam a composição da atmosfera, a configuração dos continentes e oceanos, a circulação termohalina, e vários outros a que temos vindo a fazer alusão e que a que nos referiremos mais adiante.

Embora Milankovitch não se tenha preocupado muito com a ciclicidade climática resultante da conjugação dos factores astronómicos que têm vindo a ser aludidos, o assunto tem vindo a ser abordado em múltiplas publicações das últimas décadas. Em 1976, James D Hays e colegas do projecto CLIMAP, fazendo a análise espectral (que permite decompor um sinal nas suas componentes mais frequentes) de indicadores climáticos (principalmente δ^{18}O de foraminíferos planctónicos) existentes em testemunhos longos de sedimentos marinhos (correspondentes aos últimos 450 000 anos), descobriram três picos espectrais correspondentes a 23 000, 42 000 e cerca de 100 000 anos; o primeiro, justificativo de 10% da variância climática, é correlacionável com os períodos da precessão (cerca de 23 e 19 mil anos); o de 42 000 anos, que justifica 25% da variância, tem o mesmo período da obliquidade; o de 100 000 anos, dominante, que explica 50% da variância, parece estar em fase com a excentricidade. Com base nestes resultados, os autores concluem que as mudanças na geometria orbital da Terra são a causa fundamental da sucessão das glaciações durante o Quaternário. Posteriormente, têm sido propostos outros períodos, como os de 19 000, de 21 000, de 22 000, de 24 000, de 30 000, de 54 000 e de 400 000 anos, bem como periodicidades menores e maiores (da ordem de um milhão de anos ou mais).

Neste aspecto, verificam-se duas tendências de abordagem: uma que tenta distinguir ciclicidades nos registos geológicos, nomeadamente nas colunas sedimentares recolhidas nos fundos oceânicos ou nas expressões acústicas presentes em perfis de reflexão sísmica; outra que procura definir períodos nos movimentos astronómicos, nas interacções entre eles, e nas curvas de insolação. É um assunto complexo porque, normalmente, as interacções entre os diferentes factores não são lineares. Porém, parece não ser curial aprofundarmos aqui mais o assunto.

No entanto, como exemplificação do actual estado dos conhecimentos, é relevante fazermos alusão às periodicidades de 41 000 e de 100 000 anos. A análise espectral dos dados geológicos (principalmente do δ^{18}O) sugere que, desde há cerca de um milhão de anos, a periodicidade climática dominante tem sido a de 100 000 anos (figura II.16). Todavia, recuando mais, até há uns 2,5 milhões de anos, a variabilidade climática era dominada pelo período de 41 000 anos.
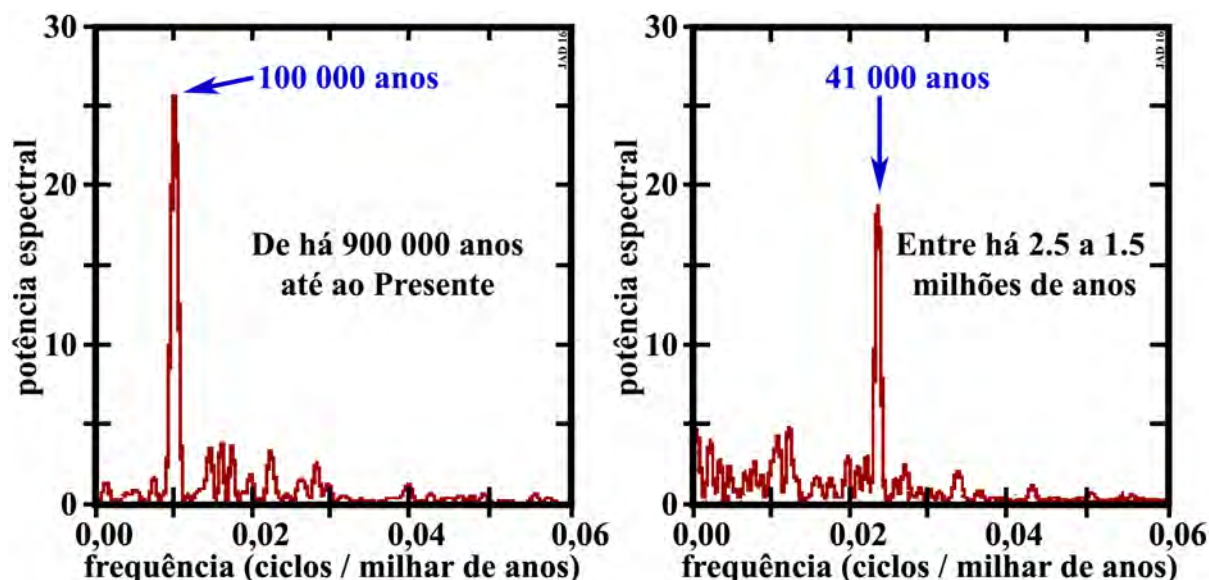
Figura II.16 – Análise espectral da variabilidade climática baseada principalmente no $\delta^{18}O$, desde há 900 000 anos até ao Presente (em que se verifica dominância do período de 100 000 anos) e no período entre 2,5 e 1,5 milhões de anos (em que a preponderância é do ciclo de 41 000 anos).

Ainda não há explicação convincente para esta modificação da periodicidade dominante, embora alguns autores advoguem que, para essa alteração, contribuiu a variação do CO_2 atmosférico. Aliás, de certa forma, esta questão liga-se à da variabilidade dos teores de CO_2 atmosférico durante os períodos glaciários e interglaciários. Já há mais de três dezenas de anos que se verificou, num testemunho de gelo da Antártida, que durante os períodos glaciários os teores de CO_2 na atmosfera baixam, subindo nos períodos interglaciários. Desde essa altura que têm sido propostos diferentes mecanismos, embora continue a não existir uma explicação que seja amplamente aceite pela comunidade científica.

A pedra de toque da teoria astronómica tem sido, principalmente, o desenvolvimento das glaciações: têm sido as convergências cronológicas entre os períodos em que a intensidade da insolação é menor e o desenvolvimento de fases glaciárias que tem servido de teste para a teoria. Todavia, actualmente, verifica-se, cada vez mais, tendência para se ter em consideração não apenas os períodos glaciários, mas sim toda a evolução climática quaternária no sentido de aferir as influências determinantes que os movimentos de médio a longo termo da Terra têm na insolação, quer global, quer hemisférica, quer latitudinal.

No contexto da teoria astronómica e das glaciações, é importante ter em consideração que as épocas glaciárias são raras no nosso planeta. No total, ocorreram em menos de 0,02% da longa história da Terra, com cerca de 4,5 mil milhões de anos. Já antes fizemos alusão às primeiras glaciações e ao paradoxo do Sol jovem e fraco, realçando que, na altura, foram causas endógenas, principalmente elevadas concentrações de gases de estufa atmosféricos, que impediram que o planeta permanecesse num estado glaciário permanente. Mesmo tendo em consideração apenas últimos 541 milhões de anos, correspondentes a 0,01% da existência do planeta, em que neste se desenvolveu vida abundante e cada vez mais complexa, ou seja, o Fanerozóico[1], as épocas glaciárias corresponderam a menos de 25% do tempo. Até ao

[1] Fanerozóico é o éon geológico que se iniciou há 541 milhões de anos e se prolongou até ao presente. O termo provém do grego antigo φανερός [phanerós] = "visível" + ζωή [zoí] = "vida", correspondendo, portanto, a vida visível, pois que foi neste éon que se desenvolveu vida com partes esqueléticas (externas ou internas) passíveis de se transformarem em fósseis com dimensões suficientes para serem facilmente encontrados.

momento, não foi formulada qualquer hipótese explicativa, baseada nos factores astronómicos, que realmente seja convincente na justificação da relativa raridade das épocas glaciárias. Na realidade, embora os factores astronómicos sejam absolutamente determinantes para a quantidade de energia radiante que é recebida pela Terra, constituindo, portanto, o grande motor climático, o sistema é bastante complexo e há, como se referiu mais acima, outros factores que podem ser também determinantes, como sejam a composição da atmosfera, a configuração dos continentes e oceanos, a circulação termohalina, e vários outros a que temos vindo a fazer alusão e que a que nos referiremos mais adiante.

II.6. Manchas solares

II.6.1. O que são as manchas solares

As manchas solares são conhecidas desde a Antiguidade Clássica. Já o filósofo da Grécia antiga Teofrasto (372 a.C.-287 a.C.), na sua obra *De signis tempestatum* (integrada nas edições modernas no tratado *De Causis Plantarum*), a elas faz referência quando diz que *se o Sol, quando nasce, tem uma marca preta, ou se se levanta sem nuvens, tal é sinal de chuva.* Uma das primeiras observações de manchas solares com telescópios (que tinham sido recentemente desenvolvidos) foi efectuada em, 1611, pelo jovem astrónomo Johannes Fabricius (1587-1616). No panfleto que publicou sobre o assunto conta que *Ao observar cuidadosamente essas coisas* [o Sol] de repente surgiu *uma mancha enegrecida* (...). *A mancha estava no Sol ou era exterior ao Sol. Se estava no Sol não havia dúvidas de que seria visto por nós novamente, mas se era exterior ao Sol era impossível que pudesse ser detectada no disco solar em dias sucessivos, pois que, pelo seu movimento, o Sol ter-se-ia afastado desta pequena nuvem ou corpo suspenso entre nós e o Sol. Passámos aquela noite mais a duvidar do que a dormir. Quando fomos despertados pelo retorno do Sol,* (...) *corremos, dificilmente contendo a demora da minha curiosidade, para ver o Sol, e observei-o. Logo numa primeira observação a mancha apareceu novamente, o que me deu grande prazer.*

Todavia, as manchas solares (figura II.17) parece terem sido primeiro observadas de forma sistemática no Verão de 1612, por Galileu Galilei (1564-1642), que, em 1613 publicou um livro, em italiano, dedicado ao assunto, em que, logo na parte inicial, refere que essas manchas *são realmente coisas, e não simples aparências, ou ilusões do olho, ou dos cristais* [do telescópio].
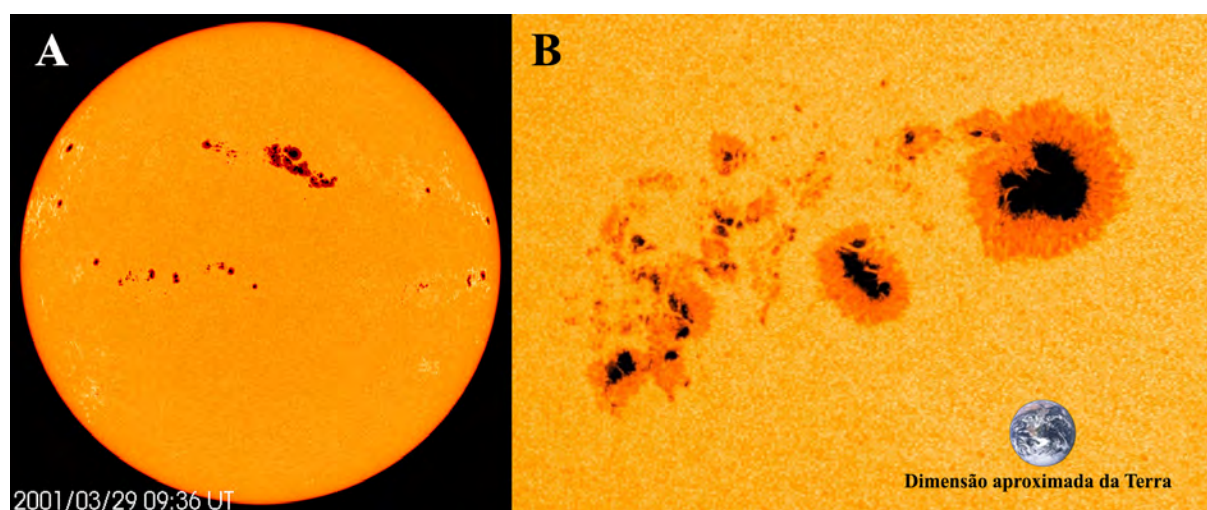
Figura II.17 – Manchas solares. A) Imagem obtida pela sonda SOHO (Solar & Heliospheric Observatory), da ESA/NASA, a 29 de Março de 2001, com o MDI (Michelson Doppler Imager), em que são visíveis grupos de manchas solares e manchas isoladas. B) Imagem de um grupo de manchas solares obtida pela sonda SDO (Solar Dynamics Observatory) da NASA, em Janeiro de 2014; para comparação, sobrepôs-se a dimensão aproximada da Terra.

As manchas solares (figura II.17) são fenómenos temporários que ocorrem na fotosfera solar, que adquirem tonalidade mais escura relativamente às regiões circundantes. Tal acontece porque, nesses locais, a temperatura superficial fica mais baixa, da ordem de 2 700 a 4 200ºC

(3 000 a 4 500ºK[1]), contrastando com a do resto da brilhante fotosfera solar, cujas temperaturas são de cerca de 5 500ºC (5 800ºK). Estas manchas solares apresentam uma auréola mais clara, designada por "penumbra", e uma região central mais escura, apelidada de "umbra". Embora as manchas surjam, muitas vezes, de forma individualizada, com frequência ocorrem em grupos constituídos por número variável, cuja média é de cerca de dez.

Constituem ocorrências efémeras, podendo perdurar de dias a semanas ou, mesmo, alguns meses, acabando por desaparecer. Têm tamanho variável, expandindo-se ou contraindo-se à medida que se vão deslocando na superfície solar, podendo atingir grandes dimensões, comparáveis ao do maior planeta do sistema solar. Desde 1874 que o *Royal Greenwich Observatory* efectua observações pormenorizadas das manchas solares, as quais, conjuntamente com as empreendidas mais recentemente, permitem concluir que essas manchas não ocorrem de forma aleatória: concentram-se em duas bandas latitudinais solares mais ou menos simétricas relativamente ao equador. Formam-se a latitudes médias, tendem a aumentar de dimensão e a movimentar-se na direcção do equador. A representação gráfica destas observações produz um "gráfico em borboleta" típico (figura II.18).
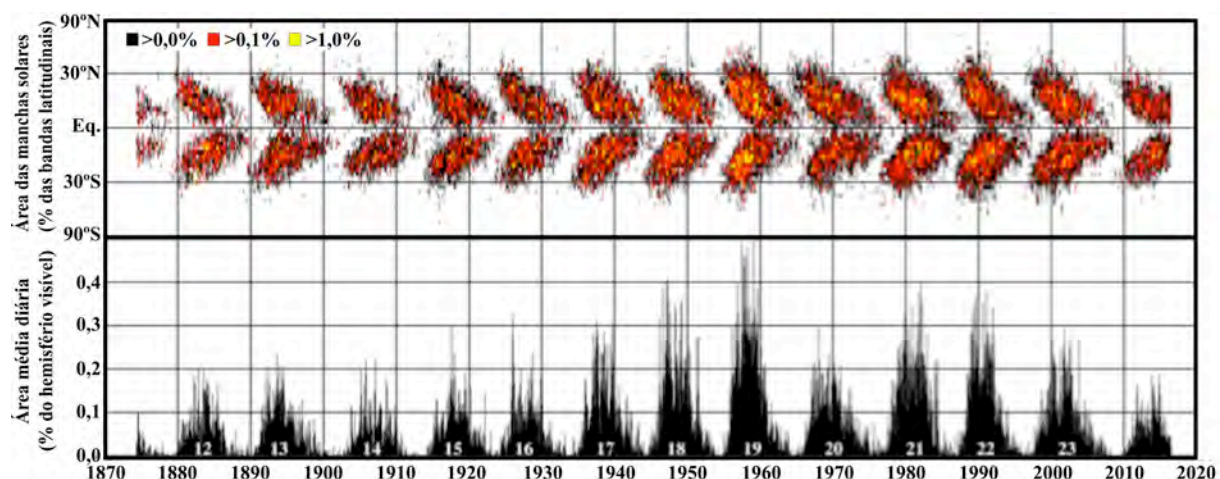
Figura II.18 – Evolução das manchas solares desde 1874. Na parte superior estão representadas as percentagens das áreas das manchas solares relativamente às bandas latitudinais do Sol (com áreas constantes). As áreas totais das manchas por bandas latitudinais estão assinaladas a preto (percentagens menores que 0,1%), a vermelho (percentagens entre 0,1% e 1%), e a amarelo (percentagens maiores que 1%). A figura resultante é um gráfico em borboleta. Na parte inferior estão representados as áreas médias diárias das manchas solares sob forma de percentagem da área do hemisfério visível. É evidente a ciclicidade de 11 anos (assinalada na parte inferior pelo respectivo número de ciclo, com algarismos a branco), e as variações de intensidade e de magnitude, entre os diferentes ciclos.

As manchas solares são provocadas por perturbações muito fortes do campo magnético do Sol. De forma simplificada, pode comparar-se o complicado processo de formação destas manchas à ejecção de materiais (e recordemos que o Sol é constituído essencialmente por hidrogénio) impulsionados pelo campo magnético, que rompem a superfície visível do Sol (fotosfera), aí criando uma mancha. Ao ser lançado no espaço, esse material é sujeito à

[1] ºK = graus Kelvin. É a escala de Kelvin ou de temperaturas termodinâmicas, cujo valor zero, designado por zero absoluto, é a temperatura em que as partículas constituintes da matéria têm movimentação mínima, não podendo tornar-se mais frias. O zero absoluto (0ºK) corresponde a -273,15ºC e, portanto, o zero da escala de Célsius (congelação da água) corresponde a 273,15ºK. Refira-se, como curiosidade, que a partir de medições de radiação cósmica de fundo se estima que a temperatura média actual do Universo seja de cerca de 2,73ºK.

atracção gravítica solar e à acção do campo magnético, pelo que volta a cair na fotosfera, gerando outra mancha solar. Com efeito, as manchas solares estão com frequência associadas a erupções solares (explosões na superfície do Sol causadas por mudanças repentinas do seu campo magnético) e a ejecções de massa coronal (grandes erupções de gás ionizado a alta temperatura, provenientes da coroa solar).

II.6.2. Os ciclos solares de 11 anos

Em 1843, o astrónomo alemão Samuel Heinrich Schwabe (1789-1875), após 17 anos de cuidadosas observações, chegou à conclusão que, *comparando uns com os outros, o número de* [dias em que existem] *grupos* [de manchas solares] *e os dias em que não existem descobrimos que as manchas solares têm uma periodicidade de cerca de 10 anos*, e acrescenta, com precaução, que as manchas *apareceram com tanta frequência por 5 anos que, durante este tempo, houve apenas alguns ou nenhuns dias livres de manchas ... O futuro mostrará se este período mostra alguma consistência.* Com efeito, tipicamente, a ocorrência de manchas solares aumenta e diminui com uma ciclicidade média de 11 anos (figura II.X16): são os chamados "ciclos solares" ou, mais especificamente, "ciclos de actividade magnética solar", também designados por "ciclos de Schwabe" (devido ao nome do cientista que os descobriu). O último mínimo das manchas solares ocorreu em 2009, e encontramo-nos, actualmente, segundo o sistema de numeração preconizado pelo astrónomo suíço Johann Rudolf Wolf (1816-1893), no ciclo número 24 (figura II.19). De acordo com este sistema, baseado na existência de observações fidedignas das manchas solares, o ciclo número 1 foi o que ocorreu entre 1755 e 1766, e o actual iniciou-se em 2009 e prolongar-se-á até 1920.
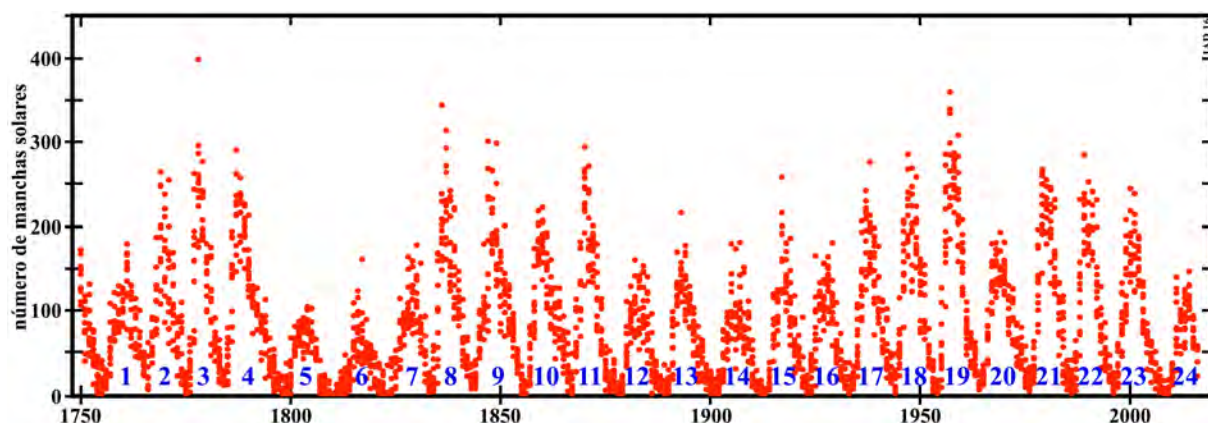
Figura II.19 – Média mensal do número de manchas solares, entre Janeiro de 1750 e Junho de 2016. É bem evidente a ciclicidade de 11 anos (numerados com algarismos a azul). O número de manchas solares é dado pela adição da quantidade de manchas isoladas com dez vezes a quantidade de grupos de manchas (pois que, em média, os grupos têm dez manchas).

Na sequência dos processos que produzem as manchas solares, parte do material (plasma) é ejectado para o espaço interplanetário, o que faz com que os raios cósmicos de alta energia que entram no sistema solar provenientes do espaço sideral sejam atenuados. As aludidas ejecções de material são moduladas pelos ciclos solares e, por consequência, a quantidade de raios cósmicos que atinge a Terra varia inversamente com a intensidade das manchas solares. Por outro lado, quando se verificam os picos dos ciclos das manchas solares, a Terra, embora receba menos raios cósmicos, é atingido por maior radiação solar. Como praticamente toda a energia do sistema climático terrestre provém do Sol, esse aumento de radiação tem, directa ou indirectamente, consequências no clima.

Observações efectuadas a partir de satélites artificiais permitiram constatar, entre o máximo e o mínimo de um ciclo solar, reduções de energia de aproximadamente 0,1%, o que, por si só, não seria, provavelmente, suficiente para influenciar o clima de forma significativa. No entanto, de forma que pode parecer um pouco surpreendente, verifica-se que na altura do máximo de manchas solares, o Sol brilha com maior intensidade. A energia que deixa a superfície solar por ocasião destes máximos parece ser proveniente das *faculae* (tochas em latim), áreas brilhantes em torno de manchas solares activas, mas o processo não é ainda bem compreendido. Verifica-se que, no que se refere à radiação ultravioleta, os comprimentos de onda curtos (UV) e extremos (EUV) podem variar mais do que 10% no decurso do ciclo solar, o que é muito significativo, podendo influenciar de forma relevante principalmente as camadas mais finas e mais sensíveis da alta atmosfera terrestre e, portanto, ter implicações importantes na variabilidade climática.

Tal é particularmente relevante na banda dos ultravioletas extremos (com comprimentos de onda entre 124 nm e 10 nm), que corresponde apenas a uma pequena fracção da radiação solar total, mas que, nos picos aludidos, se torna bastante mais intensa. Como esta radiação afecta profundamente a estrutura química e térmica da estratosfera, o aumento desta radiação ionizante produz alterações na temperatura e na condutividade eléctrica. Em 2007, os investigadores Charles D. Camp e Ka Kit Tung, da Universidade de Washington em Seattle, descobriram que o aquecimento global atribuível aos ciclos solares de 11 anos é da ordem de 0,2ºC durante os máximos das manchas solares relativamente aos mínimos dessas manchas, sendo particularmente sentido nas latitudes mais elevadas.

O efeito na camada de ozono é também significativo. O aumento da incidência de partículas solares muito energéticas na estratosfera pode reduzir os níveis de ozono, e como este funciona como filtro dos raios ultra-violetas, essa redução implica que maior quantidade dessa radiação atinge a superfície terrestre. Ao mesmo tempo, a referida redução de ozono na estratosfera pode alterar, através de uma série complexa de influências, a dinâmica da própria atmosfera, pois que o arrefecimento da estratosfera polar devida à redução de ozono aumenta o gradiente de temperatura horizontal perto da tropopausa, o que faz com que o deslocamento dos temporais à superfície se efectue fora dos padrões considerados normais. As implicações são múltiplas. Por exemplo, no Pacífico tropical, nos anos de pico dos ciclos solares, verifica-se um arrefecimento das águas oceânicas superficiais de quase 1ºC, e parece haver aumento de precipitação na Zona de Convergência Intertropical.

As alterações da ionização atmosférica afectam a abundância de aerossóis que constituem núcleos de condensação de vapor de água e, portanto, têm influência na formação de nuvens. Como se referiu, durante os mínimos dos ciclos solares a Terra é atingida por maior quantidade de raios cósmicos, o que potencia a geração de aerossóis e, portanto, propicia maiores níveis de condensação, ou seja, maior nebulosidade. Porém, as nuvens assim formadas, embora tenham longa duração, são claras e situam-se em posição elevada na atmosfera, não conduzindo, em geral, a aumento de precipitação. Todavia, são suficientes para alterar o albedo geral do planeta.

Estes ciclos de 11 anos têm várias outras consequências na sociedade, embora a magnitude com se manifestam dependa da abundância e da intensidade das manchas solares em cada fase do ciclo. Por exemplo, na fase de pico, como se referiu, devido ao aumento da incidência de partículas solares na estratosfera, esta fica mais ionizada, o que afecta de formas complexas a transmissão de ondas de rádio. Principalmente na altas frequências de rádio (HF da sigla inglesa), isto é, na banda entre 1 e 30 megahertz, as alterações na densidade e na estrutura da ionosfera alteram a propagação dessas ondas de rádio, podendo mesmo, se a intensidade da perturbação é maior, bloqueá-las completamente. É de recordar que estas frequências são as

utilizadas pelos radioamadores, mas também por muitos serviços públicos, e pela aviação, principalmente durante percursos transoceânicos, o que permite fazer ideia das consequências, e mesmo dos riscos, inerentes a estes acontecimentos.

II.6.3. Ciclos solares de duração secular

II.6.3.1. Pequeno historial

Além do bem conhecido ciclo de 11 anos das manchas solares, há ciclos mais longos e ainda pouco compreendidos. Evidências destes ciclos começaram a surgir no século XIX quando se constatou que, na segunda metade do século XVII e início do XVIII, ocorreu um período anómalo nas manchas solares, com duração de 70 anos. Tal parece ter sido inicialmente verificado pelo astrónomo alemão Friederich Wilhelm Gustav Spörer (1822 – 1895) que, num curto artigo em francês, publicado em 1889, tenta demonstrar que, no que se refere às manchas solares, *as épocas dos máximos e dos mínimos não são exactamente os mesmos nos dois hemisférios* [solares], para o que faz a análise dos registos de observações efectuadas no passado, desde o início do século XVII, verificando que, *entre as observações a que tivemos acesso, dos anos 1672-1704, não foi encontrado um único ponto boreal, e desde 1705 o número de pontos de boreais é relativamente baixo*. Noutro trabalho desse mesmo ano, Spörer, recorrendo a dados obtidos por autores anteriores, constata que *desde o ano 1650 até 1670 não há memória de que se tenham podido encontrar mais de uma ou duas* [manchas], *que foram observadas durante muito pouco tempo*. Como exemplo das fontes a que recorreu, cita-se a passagem em que refere que *Flamsteed* [o astrónomo inglês John Flamsteed (1646-1719)] *diz, em 1684, no relatório sobre a observação de um ponto [mancha]: "Estas aparições, no entanto, frequentes nos dias de Galileu e Scheiner, tornaram-se tão raras nos últimos tempos, que este é o único que vi na sua face* [do Sol] *desde Dezembro de 1676*.

O assunto viria também a ser abordado, nesse mesmo ano de 1889, em dois artigos do astrónomo suíço Johann Rudolf Wolf (1816-1893). Tendo já anteriormente, em 1852, concluído que o ciclo solar era de 11,111 anos (embora com variações entre 8 e 17 anos) e não de 10 anos, como Schwabe tinha proposto em 1843, esforçou-se por determinar o período longo em que se integrava a escassez de manchas solares referido por Spörer, sobre o qual se desenvolve a ciclicidade solar de cerca de 11 anos. Tendo como base, também, a análise das observações pretéritas desde início do século XVII, chegou à conclusão de que há duas possibilidades plausíveis para esta periodicidade, uma de 66,6 anos e outra de 83,3 anos, embora considere mais verosímil a última. Assim, um dos mínimos deste ciclo mais longo ter-se-ia verificado na 2ª metade do século XVII, o que teria causado um enfraquecimento notável da actividade solar.

Foi o astrónomo britânico Walter Maunder (1851-1928), do *Royal Greenwich Observatory* que, em 1894, deu maior divulgação a estes resultados, designando o período entre 1645 e 1715 como *um imenso mínimo solar prolongado*. Reconhecendo o valor da descoberta dos períodos de 11 anos realizada cerca de meio século antes por Heinrich Schwabe, Maunder não se coíbe, nesse artigo de Agosto de 1894 da revista *Knowledge*, de afirmar que *Justamente* (...) *foi Schwabe homenageado pela demonstração do ciclo solar, e pelo grande avanço no nosso conhecimento sobre o Sol* (...) *que tal tornou possível. Mas é igualmente necessário ter em consideração a demonstração efectuada por Wolf e Spörer desta estranha interrupção do mesmo. A teoria das manchas solares que a ignore está auto-condenada.* Adianta, ainda, que se as grandes tempestades geomagnéticas podem estar intimamente ligadas a grandes perturbações solares, então talvez uma reduzida variação magnética terrestre possa ser explicada por um magnetismo solar muito enfraquecida. Em carta dirigida à mesma revista, no mês seguinte, a astrónoma Agnes Mary Clerke (1842-1907), nascida na Irlanda,

acrescentava que *além disso, há fortes evidências, embora indirectas, de que o "mínimo prolongado de manchas solares" foi acompanhado por uma profunda calma magnética. Estas evidências encontram-se nos registos das auroras ao longo do tempo. A ligação entre a ocorrência de auroras e a condição magnética da Terra é tão estreita, que a ausência de um dos tipos de perturbação pode ser seguramente tida em consideração para denotar a ausência do outro*. Embora tal não esteja inteiramente correcto à luz dos conhecimentos actuais, a verdade é que a ligação entre as auroras e as perturbações magnéticas ficou, então, claramente estabelecida.

Este período de aproximadamente 70 anos que ocorreu na 2ª metade do século XVII e início do XVIII, em que quase não ocorreram manchas solares, viria a ser designado, em 1976, pelo astrónomo norte-americano John Allen Eddy (1931-2009), do *National Center for Atmospheric Research*, em Boulder, no Colorado, por "Mínimo de Maunder".

Progressivamente, foi-se adquirindo a percepção de que o mínimo de Maunder se enquadrava num ciclo solar longo que modulava os ciclos de 11 anos (ou de Schwabe). Em 1944, o astrónomo Wolfgang Gleißberg (1903-1986), nascido na Polónia mas que desenvolveu o seu trabalho na Turquia e na Alemanha, escrevia que *não só muitas das características do ciclo solar de 11 anos revelam flutuações sistemáticas, mas também os valores extremos destas características, conforme avaliado a partir das médias de quatro ciclos, ocorrem todos aproximadamente ao mesmo tempo. Tal aponta para a existência de um ciclo solar longo.* Acrescentava ainda que *O intervalo* (...) *correspondente a três ciclos solares longos, é de 21 ciclos de onze anos, ou 233,2 anos, e, portanto, um ciclo solar longo corresponde a 7 ciclos de onze anos, ou 77,7 anos*, concluindo que *as variações da actividade solares são regidas por dois ciclos, (1) o bem conhecido ciclo de onze anos e (2) um ciclo longo que produz mudanças sistemáticas das características do ciclo de onze anos e que inclui 7 ciclos de onze anos*. Embora com um substrato científico ampliado que propiciava uma análise mais pormenorizada, estas conclusões vêm na linha das que Wolf tinha apresentado em 1889, e que sugeriam periodicidades de 66,6 ou de 83,3 anos. O assunto viria a ser mais profundamente explorado por Gleissberg nas décadas seguintes. Em homenagem ao esforço por ele empreendido na investigação deste assunto, estes ciclos solares longos, com cerca de 80 anos, são actualmente designados por "ciclos de Gleissberg".

Embora os dados observacionais só existam desde inícios do século XVII, vários *proxies,* nomeadamente os isótopos cosmogénicos (mas também vários outros de índole geológica e biológica) permitem estabelecer séries mais longas. Um dos isótopos que tem sido bastante utilizado para, indirectamente, reconstruir o número de manchas solares no passado, é o Carbono 14 ou radiocarbono (^{14}C), que está constantemente a ser produzido por interacção dos raios cósmicos com o Azoto. Quando a actividade solar é alta (existindo, portanto, mais manchas solares), o campo magnético do Sol estende-se mais pelo espaço interplanetário, assim protegendo a Terra de forma mais eficaz dos raios cósmicos; consequentemente, verifica-se redução da produção de ^{14}C. Pelo contrário, quando a actividade solar é baixa (menos manchas solares), a atmosfera terrestre é bombardeada por mais raios cósmicos, produzindo-se mais ^{14}C. Como as árvores, para formar os anéis de crescimento, absorvem o carbono atmosférico, neles integram as proporções de isótopos de carbono existentes no ar, ou seja, o aumento ou diminuição de ^{14}C relativamente aos outros isótopos deste elemento (o que é designado por $\delta^{14}C$) é teoricamente proporcional à produção de ^{14}C na alta atmosfera, a qual reflecte a maior ou menor incidência de raios cósmicos e, portanto, por inferência, a menor ou maior existência de manchas solares. Este é um dos métodos que tem permitido deduzir como teria sido a evolução da energia recebida do Sol (e indirectamente, dos ciclos solares) nos últimos milhares de anos (figura II.20).
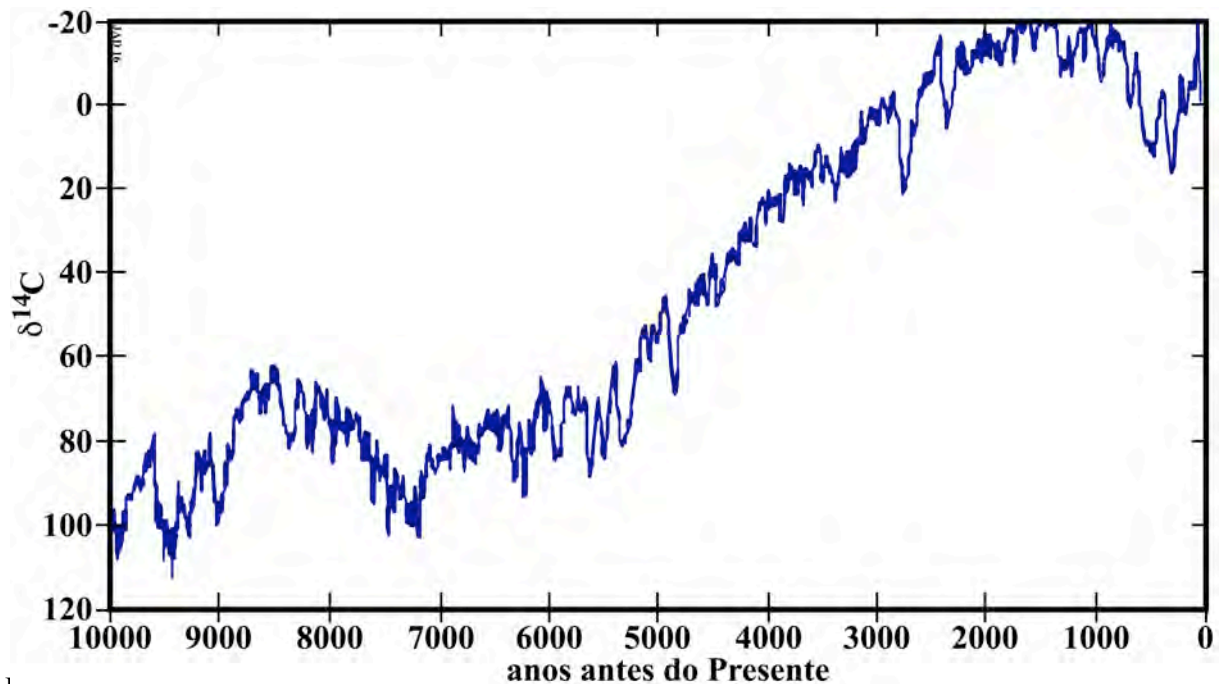
Figura II.20 – Evolução do $\delta^{14}C$ atmosférico (tal como registado nos anéis de crescimento das árvores) na última dezena de milhares de anos. Para melhor compreensão, a escala (a azul) está invertida. Em escalas temporais alargadas, como esta, a correlação com o número de manchas solares não é directa, pois que há que ter em consideração outros factores, nomeadamente os movimentos da Terra relativamente ao Sol, ou seja, os Parâmetros de Milankovitch.

Porém, quando se utiliza o $\delta^{14}C$ em escalas temporais alargadas, da ordem da dezena de milhares de anos ou superiores, os resultados não são directamente correlacionáveis com o número de manchas solares, pois que a produção do ^{14}C está relacionada, na realidade, com a quantidade de raios cósmicos que atinge a Terra. É certo que quando há mais manchas solares o campo magnético do Sol é intensificado e, portanto, protege mais a Terra desses raios cósmicos. Todavia, nessas escalas alargadas, os movimentos do planeta relativamente ao Sol (Parâmetros de Milankovitch), principalmente a excentricidade da órbita (ver ponto II.4.6.), começam a ser significativos, o que interfere nos processos aludidos. É certo que há técnicas para compensar, na evolução do $\delta^{14}C$, essas influências, fazendo ressaltar os ciclos da variação do número de manchas solares, mas por agora não pormenorizaremos o assunto. De qualquer modo, é interessante comparar a evolução expressa na figura II.20 com o que mais atrás (ponto I.5.) referimos sobre a evolução do clima nos últimos milhares de anos e suas presumíveis incidências sociais.

O que é relevante de momento é debruçarmo-nos um pouco sobre a evolução do número de manchas solares (utilizando o $\delta^{14}C$ como *proxy*) no último milhar de anos (figura II.21), período em que os Parâmetros de Milankovitch não têm grandes variações significativas. Alem disso, este proxy tem vindo a ser aferido por outros métodos indirectos (ou seja, outros *proxies*).
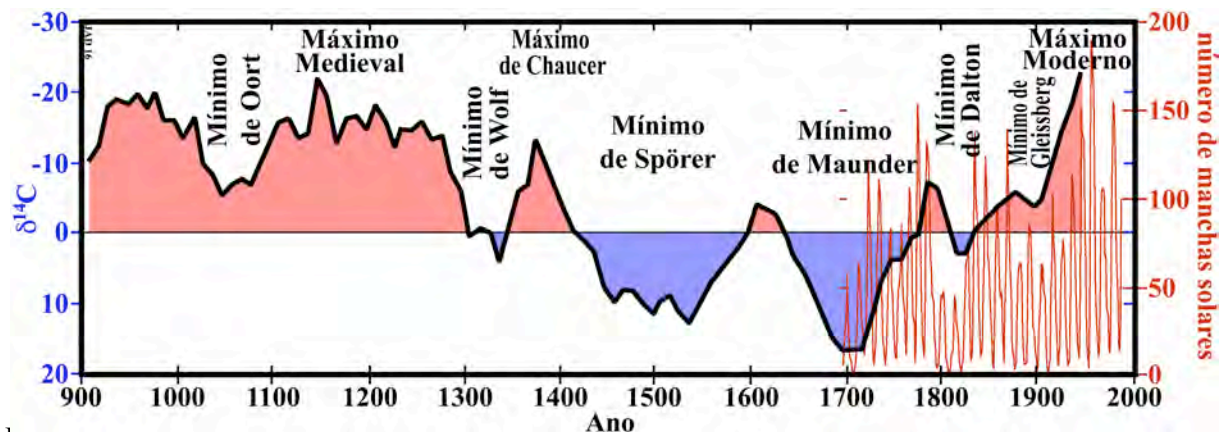
Figura II.21 – Evolução do $\delta^{14}C$ atmosférico (tal como registado nos anéis de crescimento das árvores), que é um indicador do número de manchas solares. Para melhor compreensão, a escala (a azul) está invertida. Mínimos de $\delta^{14}C$ correspondem a máximos do número de manchas solares, com um desfasamento de alguns anos, devido ao tempo que o sinal do radiocarbono atmosférico demora a responder a modificações da actividade solar. Para aferir da correlação, representou-se a vermelho a variação do número de manchas solares, onde é visível a ciclicidade de cerca de 11 anos (ciclos de Schwabe). Na curva a preto são identificáveis os ciclos de cerca de 80 anos (ciclos de Gleissberg), bem como os de aproximadamente 200 anos (ciclos de Suess) e, porventura, outros mais longos.

Nesta reconstrução é evidente o aludido mínimo de Maunder, que ocorreu entre 1645 e 1715, coincidindo com o período mais agreste da Pequena Idade do Gelo. Outros períodos de mínimos de manchas solares têm vindo a ser identificados, a que se têm atribuído nomes que homenageiam cientistas com trabalho relevante no assunto (mínimos de Oort, de Wolf, de Spörer, e de Dalton).

II.6.3.2. Ciclos de manchas solares e clima

Como acima se referiu, quando há mais manchas solares, o campo magnético do Sol fica mais forte, e como este se estende pelo espaço até muito para lá da órbita da Terra, o planeta fica mais protegido da incidência da radiação cósmica intergaláctica (figura II.22). Verifica-se, também, que nestes períodos de maior número de manchas solares, a Terra recebe mais energia radiante Sol. Na situação inversa, quando o número de manchas solares é pequeno, acontece o inverso: a Terra fica menos protegida da radiação cósmica (e, devido a isso, a frequência de auroras boreais e austrais amplia-se) e o planeta recebe menos energia radiante Sol. É um processo cujos contornos ainda não são bem percebidos, mas verifica-se tendência para que, nos períodos de maior número de manchas solares, na Terra se desenvolvam menos nuvens na alta atmosfera e que o clima fique menos frio. Quando o número de manchas solares é pequeno ou quase não existem, acontece o oposto, ou seja, o planeta adquire maior nebulosidade (nuvens altas que, em geral, não proporcionam pluviosidade), e o clima torna-se mais frio.

Como o grande motor climático terrestre é a energia que o planeta recebe do Sol, tal tem, forçosamente, incidências no clima. É certo que, nos ciclos de Schwabe (de cerca de 11 anos) tal, como é óbvio, também se verifica. Porém, devido ao curto período e aos tempos de reacção dos múltiplos factores climáticos, bem como dos *proxies* ao nosso dispor, essas modificações não são fáceis de detectar, principalmente em épocas anteriores à climatologia instrumental, até porque se confundem com a variabilidade natural do clima e com outras ciclicidades solares. Por outro lado, as incidências das variações da radiação solar provocadas pelos movimentos de longo período da Terra (com frequência designados por parâmetros de

Milankovitch) têm também, como já se referiu, grande relevância. Porém, são actuações progressivas que se desenvolvem ao longo de dezenas de milhares de anos, que não são facilmente detectáveis quando nos debruçamos na evolução climática durante o período histórico. No entanto, devemos ter sempre presente que as variações de períodos mais curtos, como sejam as dos ciclos das manchas solares, se desenvolvem sobre essas modificações bastante mais lentas, mas que, tanto quanto se sabe, são absolutamente estruturantes. Assim, olhando para o passado recente, digamos que, no último milhar de anos, as variações do forçamento solar sobre o clima parecem ser bastante mais evidentes nos ciclos solares de período médio a longo, normalmente apelidados de ciclos seculares.
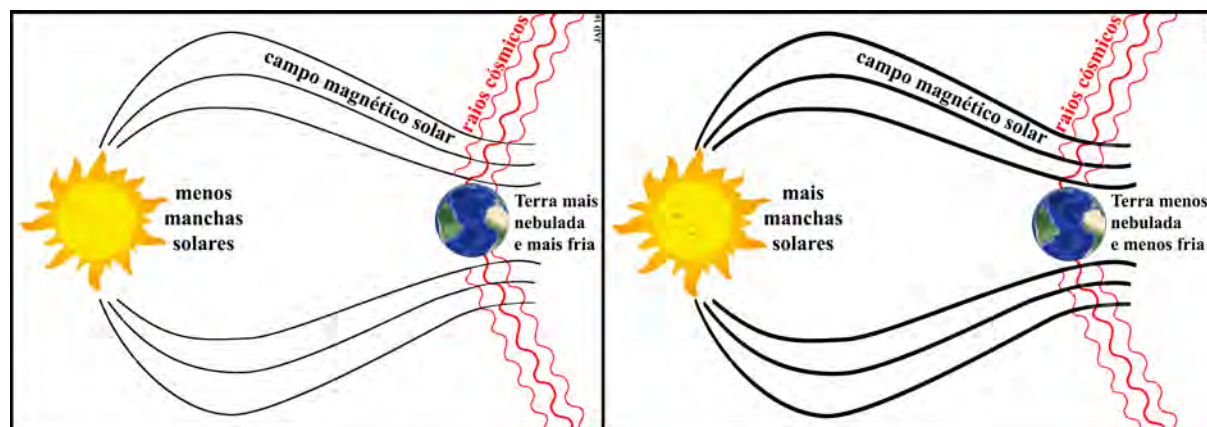
Figura II.22 – Representação esquemática das consequências do maior ou menor número de manchas solares na Terra.

O ciclo solar mais evidente e mais conhecido, até porque as observações satelitárias permitiram já ter um tempo de observação suficientemente longo, é o Ciclo de Wolf, com período de cerca de 11 anos. Porém, estes ciclos são modulados por outros de maior duração, alguns ainda bastante mal conhecidos. Os Ciclos de Gleissberg, com período médio de cerca de 80 anos (variando aproximadamente entre 70 e 100 anos) parecem ser, também, evidentes nas reconstruções existentes. Mas outros ciclos mais longos têm vindo a ser deduzidos das reconstruções existentes, como é o caso dos Ciclos de Suess, também designados por Ciclos de de Vries, com peridiocidade de aproximadamente 200 anos (período médio de cerca de 210 anos), e os Ciclos de Wheeler, com períodos de 520 a 560 anos. Aparentemente há outros ciclos ainda mais longos, ditos milenares, como os propostos Ciclos de Eddy, com aproximadamente 1000 anos, os Ciclos de Hallstatt, com período de cerca de 2 300 anos, e outro, a que ainda não foi atribuída designação, cuja periodicidade seria da ordem dos 6 000 anos.

É um assunto complexo, cujos contornos não se conhecem ainda bem, mas de grande importância para percebermos o funcionamento do sistema climático da Terra e a evolução do clima nos últimos milhares de anos. São vários ciclos, com períodos diferenciados, e a variação do número de manchas solares é resultante da adição de todos esses ciclos. Do ponto de vista conceptual, se os picos de todos esses ciclos coincidissem num determinado momento, o número de manchas solares seria máximo, acontecendo o inverso se os mínimos desses ciclos fossem concordantes. Como, basicamente, o número de manchas solares é um indicador da energia que a Terra recebe do Sol, o assunto tem, como se disse, grande importância para percebermos melhor o nosso clima.

Olhando para a reconstrução do número de manchas solares (utilizando como *proxy* o $\delta^{14}C$) abrangendo mais ou menos o último milénio (Figura II.21), parecem ser evidentes os ciclos solares de período médio aludidos (e outros). Considerando que, como se disse, nas fases em

que ocorrem mais manchas solares a Terra recebe mais energia solar e tem, portanto, tendência para aquecer, acontecendo o oposto quando o número dessas manchas é pequeno, tal teve, seguramente, influência determinante na evolução climática histórica e, consequentemente, na evolução das sociedades.

Aliás, num primeiro relance a essa curva de variação das manchas solares, ressaltam imediatamente as convergências entre o chamado Máximo Medieval de manchas solares e a Anomalia Climática Medieval (Pequeno Óptimo Climático), e entre os Mínimos de Wolf, de Spörer e de Maunder e a Pequena Idade do Gelo. Comparando esta reconstrução das manchas solares com reconstruções, abrangendo o mesmo período, da Oscilação do Atlântico Norte (NAO, sigla derivada da designação em inglês *North Atlantic Oscillation*), da humidade (chuva), da temperatura, e de outros indicadores climáticos, verificam-se boas convergências, que por vezes podem ser consideradas notáveis, atendendo a que todas têm por base a utilização de *proxies* (que respondem ao forçamento climático de formas diversas e com algum atraso), a que a variabilidade climática espacial é grande, e a que o clima está sujeito a factores endógenos (como o vulcanismo e a circulação termohalina) que, com frequência, induzem perturbações climáticas que se podem sobrepor, de alguma forma, ao forçamento solar.

II.6.4. Ciclos solares, história do clima e evolução das sociedades

II.6.4.1. O Máximo Solar Medieval e o Pequeno Óptimo Climático

Sabe-se, de outras reconstruções, que a radiação solar total foi relativamente elevada (maior número de manchas solares) durante grande parte do século IX, tendo diminuído na transição deste século para o seguinte. Correspondeu, no entanto, a um mínimo relativo de manchas solares, curto, por vezes designado por "Mínimo do Ano 900", que parece ter-se prolongado, apenas, por um par de décadas. A recuperação foi rápida, dando origem à primeira fase do Máximo Medieval de manchas solares, máximo este que se prolongou até finais do século XIII. Com uma radiação solar mais elevada e relativamente persistente, iniciou-se o estabelecimento de uma configuração diferente dos padrões de circulação atmosférica que, como se disse, perdurou durante uns quatro ou cinco séculos, embora com inflexões e interrupções, a que se seguiram recuperações para a situação antecedente. Foi uma época em que as temperaturas atmosféricas subiram em muitas regiões, o que está bem expresso na maior parte das reconstruções da evolução das temperaturas, razão porque lhe foram atribuídos os epítetos, além de Anomalia Climática Medieval, de Pequeno Óptimo Climático e de Período Quente Medieval. Todavia, é preciso ter presente que o aquecimento aludido não foi generalizado: as complexas interacções oceano - atmosfera fizeram com que os comportamentos tivessem sido geograficamente heterogéneos, conduzindo, mesmo, a arrefecimento nalgumas regiões, como parece ter acontecido no Pacífico Oriental.

A configuração dos padrões de circulação atmosférica que se começou a estabelecer no início do século X fez com que a NAO, tal como a ENSO (El Niño–Southern Oscillation), se tornassem fortemente positivos. Como já se viu no ponto I.4, quando os índices da NAO são positivos (NAO+), tal significa que a diferença de pressão entre o centro subtropical de altas pressões (Anticiclone dos Açores) e o centro subpolar de baixas pressões (Depressão da Islândia) é elevada, o que induz a ocorrência de temporais de Inverno mais frequentes e mais intensos, que se deslocam numa trajectória mais para Noroeste, atravessando o Atlântico em direcção ao Norte da Europa. Assim, sob influência de uma NAO+ preponderante (na Figura II.23 representou-se uma das reconstituições, produzida em 2015 por uma equipa internacional que integra Andy Baker), o noroeste europeu começou a ter, em geral, invernos amenos e chuvosos, reforçando a tendência que vinha já do século IX, e que tinha sido

interrompida pelo Mínimo do Ano 900. Pelo contrário, no norte de África e na Europa meridional verificou-se propensão para se instalaram condições de maior secura e mais frio. Estas tendências parecem ser confirmadas por grande parte das reconstruções climáticas destas regiões.
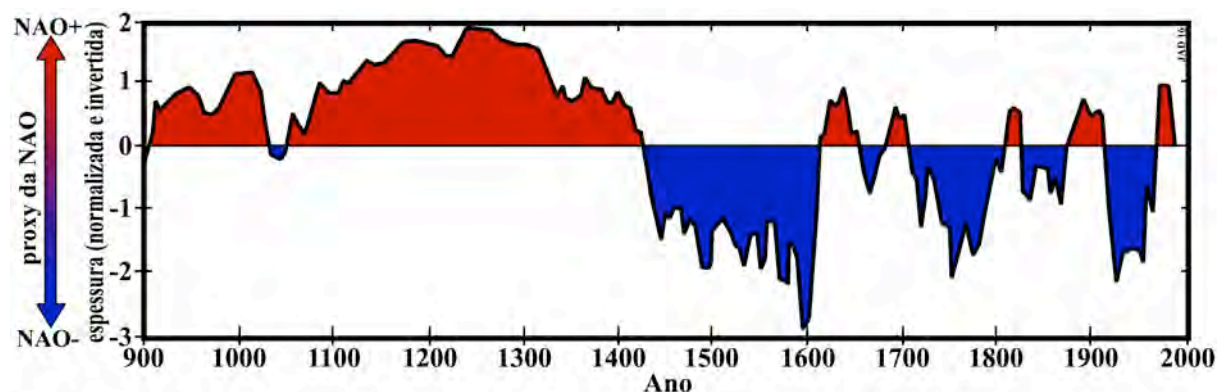
Figura II.23 – Evolução da humidade determinada a partir da espessura dos anéis de crescimento de espeleotemas[1] de grutas da Escócia, que se considera ser um bom *proxy* da chuva que cai na região, indicando condições de maior humidade ou maior secura, constituindo, portanto, também um *proxy* do índice de Inverno da Oscilação do Atlântico Norte. Os dados foram normalizados para toda a série analisada (1475 a.C. a 1996). A curva aqui apresentada foi suavizada para eliminar pequenas irregularidades e oscilações, e realçada com áreas vermelho (presumível NAO+) e a azul (presumível NAO-).

Na parte setentrional do Atlântico Norte, as temperaturas atingiram provavelmente valores mais elevados em meados do século IX, no século X (após o Mínimo do Ano 900) e início do XI (figura II.24). Estas condições são, como é óbvio, propícias para a agricultura e, por outro lado, fazem com que, no mar, a latitudes maiores, haja menos gelo, o que facilita a navegação. Refira-se ainda que, sob tais condições, os peixes de águas frias migram mais para norte. Assim, é possível deduzir que foi o aquecimento relacionado com maior número de manchas solares que estimulou a expansão dos povos nórdicos: as condições climáticas seriam propícias a boas colheitas agrícolas, induzindo crescimento demográfico; os *stocks* pesqueiros que migraram mais para norte exigiram aperfeiçoamentos nas embarcações e nas técnicas de navegação (até aos séculos VII / VIII navegavam apenas com remos, e só posteriormente introduziram a vela e desenvolveram os *knorr*, para transporte e comércio, e os *drakkar*, para a guerra); com navios adequados e técnicas mistas de navegação (vela e remos), incitados pela pressão demográfica, encetaram um período de expansionismo, instituindo-se como grandes comerciantes navais europeus. Nesta expansão, acabaram por ocupar, nos séculos VIII e, principalmente, no IX, pelo menos de início, terras inabitadas ou demograficamente deprimidas, onde fundaram povoados, como aconteceu nas Ilhas Faroé, Shetland, Órcades, bem como na Irlanda e na Escócia. Exceptua-se o caso da região de Inglaterra, atacada no

---

[1] Espeleotema, termo derivado do grego σπήλαιον (spélaion) = "caverna", "gruta" + θέμα (théma) = "tema", "assunto", significando literalmente o que se refere a grutas. Em geologia espeleotema refere-se genericamente às concreções que ocorrem no interior das grutas como resultado da cristalização de minerais dissolvidos na água, como as estalactites, que se originam no tecto, e as estalagmites, que crescem a partir do chão. O processo típico de formação começa com a água da chuva que reage com o CO_2 do solo formando ácido carbónico [$H_20 + CO_2 \rightarrow H_2CO_3$]. A solução ligeiramente ácida assim constituída, ao circular em formações carbonatadas (como o calcário), dissolve as rochas [$CaCO_3 + H_2CO_3 \rightarrow Ca^{2+} + 2\ HCO_3$], ficando enriquecida em iões de cálcio. Ao penetrar nas grutas, este líquido, através da queda de gotas, vai-se evaporando, precipitando calcite [$Ca^{2+} + 2\ HCO_3 \rightarrow CaCO_3 + H_2O + CO_2$].

século IX, mas aí num contexto diferente que, por agora, não interessa analisar. É nesta sequência influenciada por condições favoráveis que os vikings chegam à Islândia, em 825, à Groenlândia, em 985, e mesmo à América do Norte, por volta do ano 1000.
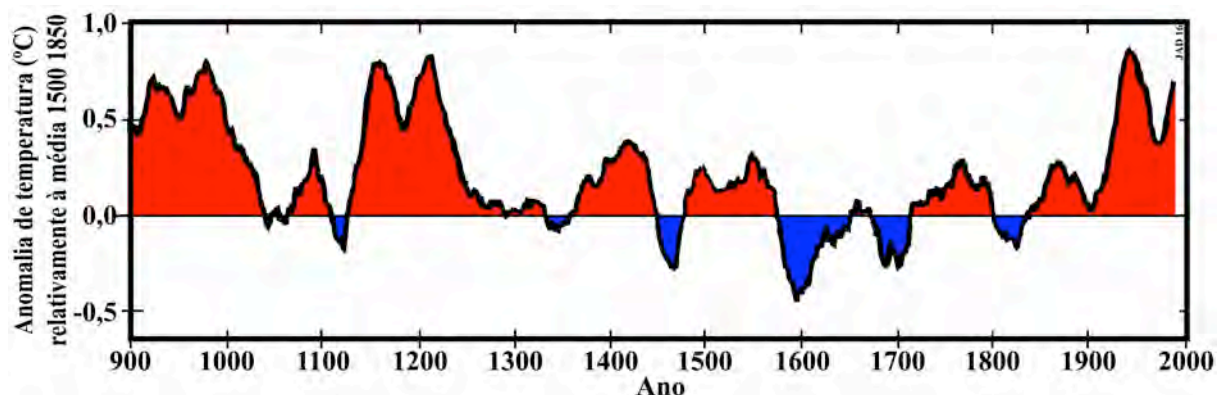
Figura II.X21 – Reconstrução das temperaturas do Verão europeu entre o ano 900 e finais do século XX, normalizada, suavizada com médias móveis de 31 anos, e expressa em termos de anomalias relativamente ao período 1500-1850.

A primeira fase na Anomalia Climática Medieval (correspondente ao Máximo Medieval de manchas solares), em que se verificou a expansão dos povos nórdicos e, por exemplo, em Inglaterra se produzia vinho pelo menos até à fronteira com a Escócia, foi interrompida pelo Mínimo de Oort, um pequeno período de cerca de 4 décadas, mais ou menos entre 1010 e 1050, em que o número de manchas solares diminuiu, que parece ter atingido os valores mais baixos por volta de 1030 (figura II.21). Todavia, segundo várias reconstruções, o número anual de manchas solares nunca teria descido abaixo de 100, ao contrário do que se verificou nos mínimos posteriores. Portanto, é possível que tenha correspondido apenas a um arrefecimento moderado, mas com implicações nos padrões de circulação atmosférica, nomeadamente na Oscilação do Atlântico Norte, que se teria caracterizado por maior frequência de índices negativos, condições que proporcionam Invernos mais frios e secos no norte da Europa e húmidos na Europa meridional e norte de África. Com efeito, os *proxies* da temperatura sugerem, de forma geral, que as temperaturas diminuíram, permanecendo significativamente inferiores ao que era costume no antecedente, assim permanecendo durante grande parte do século XII. Tal tende a ser confirmado, por exemplo, pela análise de espeleotemas de grutas da Escócia e pelos anéis de crescimento de árvores de Marrocos.

Na segunda fase do Máximo Medieval de manchas solares, mais importante e prolongada, que se seguiu ao Mínimo de Oort, os índices da Oscilação do Atlântico Norte voltaram a ser predominantemente positivos, voltando a provocar Invernos temperados e chuvosos no noroeste da Europa, condições que persistiram, embora com oscilações, até meados do século XIII, enquanto que as regiões do Norte de África e da Europa meridional, quando a Oscilação do Atlântico Norte atingiu a sua maior força medieval, foram sujeitas a seca intensa. Por exemplo, a análise dos anéis de crescimento de cedros de Marrocos indicam que, a seguir ao Mínimo de Oort, se instalaram condições de extrema aridez, embora entrecortadas por alguns curtos períodos mais húmidos, que se prolongaram até inícios do século XIV. A esta segunda fase do Máximo Solar Medieval (correspondente, na terminologia frequntemente utilizada, ao Período Quente Medieval) esteve associado notável expansão demográfica, principalmente nas regiões em que as condições climáticas propiciavam crescimento da produção agrícola, como era o caso do Noroeste Europeu. No sul da Europa, tal crescimento parece ter sido bastante mais moderado. Na Península Ibérica, segundo as estimativas do historiador Vicente Perez Moreda, da Universidad Complutense de Madrid, a população rondaria, em 1100, os

4,5 milhões, tendo crescido apenas um milhão nos dois séculos seguintes. Para este moderado crescimento demográfico contribuíram, seguramente, as secas recorrentes, mas também os efeitos negativos da guerra da Reconquista. Aliás, são muitos os indícios de secura na altura. Apenas como exemplo, refere-se o trabalho de uma equipa de investigadores espanhóis que identificaram nos sedimentos de um pequeno lago do NE de Espanha, na unidade sedimentológica correspondente ao período de 1245 a 1305, indícios evidentes da existência de fogos florestais, que muito provavelmente tinham maior expressão devido às condições prevalecentes de secura.

A relativa estabilidade das condições climáticas que se prolongaram desde o século X até finais do século XIII parece ter induzido condições sociais específicas. Como lembra a historiadora norte-americana Janet Lippman Abu-Lughod (1928-2013), foi nesta época que, progressivamente, se foram estabelecendo e alargando órbitas independentes de troca, que acabaram por se fundir num sistema mundial integrado que ligava o comércio do Oriente com o do Ocidente. Tal propiciou que as elites europeias adquirissem novos gostos pelas especiarias, pelas sedas e pelas cerâmicas do Oriente que, na maior parte, eram pagos com a prata cuja exploração estava em expansão da Europa. Esta rede global de comércio está bem expressa, embora de forma romanceada e imaginativa, na narrativa que o mercador veneziano Marco Pólo (1254-1324) publicou por volta de 1300, com o título “Livro das Maravilhas do Mundo”, geralmente conhecido por “Viagens de Marco Pólo”.

Ao que tudo parece indicar, este Máximo Medieval de manchas solares, que se prologou até à segunda metade do século XIII (figura II.21), devido à maior energia radiante recebida do Sol, induziu temperaturas globais e do hemisfério Norte que, em geral, foram relativamente elevadas (figura II.24). Como se referiu, devido a esse forçamento climático, a NAO tinha índices predominantemente positivos (figura II.23), tornando os Invernos húmidos no NW europeu e tendencialmente seco no Norte de África e no Sul da Europa. Também no Oceano Pacífico a ENSO parece ter sido, nesta altura, fortemente positiva, estabelecendo condições de secura na parte Oeste tanto da América do Sul, como da América do Norte, enquanto que, em todo o sul da Ásia, as chuvas das monções foram aparentemente muito intensas. Porém, é preciso ter sempre presente que o forçamento climático devido à radiação solar é, com frequência, influenciado e até alterado por outros factores, nomeadamente o vulcanismo. Com efeito, principalmente entre 1167 (erupção do Kirishima, no Japão) e 1284 (erupção do Etna, em Itália), decorreu um período de cerca de 120 anos em que as erupções foram frequentes, estando muitas vezes registadas como picos de sulfatos em testemunhos de gelo e de sedimentos marinhos.

II.6.4.2. O Mínimo de Wolf e “A Grande Transição”

Os padrões de organização climática e social estabelecidos durante a Baixa Idade Média começaram a ser profundamente alterados em finais do século XIII. Por volta de 1270 o número de manchas solares começou a diminuir: foi o Mínimo de Wolf, que ocorreu aproximadamente entre 1280 e 1350 (figura II.21). Como a radiação solar recebida pela Terra diminuiu, as temperaturas globais e hemisféricas desceram (figura II.24), e os padrões de circulação atmosférica estabelecidas há uns três ou quatro séculos começaram a modificar-se substancialmente. Embora, aparentemente, com atraso, a NAO começou a enfraquecer. Pelo que se pode deduzir dos anéis de crescimento de estalactites de grutas da Escócia, analisados no aludido trabalho de Andy Baker e colegas, a precipitação na Escócia começou a diminuir, inferindo-se que o Norte da Europa, devido a enfraquecimento da NAO, deixou de estar na trajectória directa de massas de ar húmido provenientes do Atlântico, permitindo que altas pressões polares se estendessem mais para sul, provocando Invernos frios com características

árcticas. Nestas condições, é dedutível que, no Sul da Europa e no Norte de África, se começassem a estabelecer condições de maior humidade. Era o padrão geral de circulação que se estava a desestabilizar e a modificar-se e, como é normal em ocasiões como esta, ampliou-se a frequência de eventos climáticos extremos, com os óbvios impactes negativos para a agricultura local e regional, da qual as sociedades eram profundamente dependentes, provocando, por consequência, perturbações na organização social.

Como é reconhecido pelo historiador Bruce Mortimer Stanley Campbell, da Universidade de Belfast, em consequência destas intensas perturbações ocorridas desde finais do século XII até ao início do XIV, as tensões político-económicas aumentaram, os conflitos inter-estatais multiplicaram-se e o *stress* ecológico climaticamente induzido tornou-se cada vez mais evidente. A exposição repetida aos referidos eventos naturais e humanos extremos foi erodindo a capacidade do sistema para absorver as consequências, ou seja, a resiliência dos sistemas (naturais e sociais) começou a ser ultrapassado. Era um ciclo que terminava e transitava para novo ciclo. As estruturas de poder estabelecidas e as relações de produção existentes ficaram periclitantes, o que conduziu a novas reformulações em quase todas as regiões. Os padrões de comércio internacional e o volume de negócios diminuíram drasticamente. Com efeito, as redes comerciais, nomeadamente envolvendo a Europa e a Ásia, começaram a ser estioladas.

Tal aconteceu com a chamada "Rota da Seda", que ligava a Europa à China, e que tinha atingido o seu apogeu durante o Império Mongol, cujas conquistas, iniciadas por Genghis Khan (1161-1227), foram efectivadas desde inícios do século XIII, e tiveram efeitos estabilizadores no que se refere à vida social, cultural e económica da região, trazendo um período de relativa paz (a *Pax Mongolica*), cuja administração unificada ajudou a criar facilidades de comunicação e comércio em toda esta vasta área que se estendia da China à Europa Oriental, e que culminou com a conquista de toda a China, em 1294, por Kublai Khan (1215-1294), onde fundou a dinastia Yuan. Mas a unificação política da vasta área abrangida pelo que foi o maior império até então constituído, ocorreu numa altura em que se estava a iniciar uma reorganização climática global.

A diminuição das precipitações de Inverno estão bem estabelecidas no SE asiático. Por exemplo, Brendan M. Buckley e colegas, em 2010, fizeram a reconstituição climática da região entre 979 e 2008, baseados nos anéis de crescimento de árvores do Vietname, o que ajuda a perceber a ascensão e queda do Império Khmer, e o que aconteceu na região com a transição de um ciclo climático (forçado pelo Máximo Solar Medieval) para outro (iniciado com o Mínimo de Wolf). Este império impôs-se, a partir do século IX, em condições de certa regularidade das monções e, portanto, em geral, de abundância de água. Em Angkor, a capital, no sentido de fazer face à típica irregularidade das monções, foi aí construído um complexo sistema de canais e reservatórios destinado a estabilizar, armazenar, e distribuir a água por toda a área, por forma a propiciar a irrigação dos campos, assegurando as colheitas, e a suportar o aumento populacional, bem como a servir de ligação entre o centro da cidade e os seus vastos subúrbios. Este sistema atingiu a sua máxima expressão em finais do século XII, cobrindo uma área de cerca de 1 000 km^2. Por essa razão, Angkor é normalmente apelidada de "cidade hidráulica". Porém, nas décadas de transição entre o século XIII e o XIV, as monções começaram a falhar. Instalou-se uma seca severa e prolongada. Segundo a reconstrução aludida, 6 dos 40 anos mais secos da série ocorreram em meados do século XIV. De acordo com as crónicas, esta seca intensa parece ter-se feito sentir, também, noutras regiões, nomeadamente no Sri Lanka, na Índia e, mesmo, na China Central. Estas alterações, ocorridas na época da transição entre o que é costume designar por Período Quente Medieval (Pequeno Óptimo Climático) e a Pequena Idade do Gelo (LIA), coincidiram com (ou

influenciaram) grande quantidade de vulnerabilidades sociais e restrições operacionais, gerando uma situação que acabou por fazer com que Angkor deixasse de ser uma cidade viável, que acabou por ser saqueada em 1431. Claro que a reorganização dos padrões climáticos teve, seguramente, grande influência nesta sucessão de acontecimentos. Porém, devemos ter sempre presente que o sistema climático é extremamente complexo, e que vários outros factores podem perturbar o seu funcionamento. Por exemplo, ocorreram na altura duas grandes erupções vulcânicas nas zonas tropicais, em 1258 e em 1453, que curiosamente (ou não) correspondem a dois dos anos mais húmidos da reconstrução referida.

Pouco após a morte de Kublai Khan, em 1294, o Império Mongol começou a desintegrar-se em entidades concorrentes, perdendo-se a unidade política, cultural e económica da Rota da Seda, o que tornou cada vez mais difícil a utilização deste percurso comercial. Na Ásia Central, caracterizada pela aridez, as baixas precipitações de Inverno das regiões meridionais, acima aludidas, fazem pressupor que as massas de ar provenientes de oeste que chegavam ao interior continental estavam, então, ainda mais depauperadas de humidade, fazendo com que a região se mantivesse em condições de seca perene, agora porventura ainda mais intensificada. Vários indícios apontam para tal, referindo-se, entre vários outros possíveis, o trabalho de 2010 da equipa de investigadores chineses que integra XiaoHua Gou, em que é identificado um período de caudais extremamente baixos na parte superior do Rio Amarelo, entre 1295 e 1309, que apenas foi ultrapassado em secura, em toda a série de 1234 anos, pelo período entre 1473 e 1500 (já num outro mínimo solar, o Mínimo de Spörer, ou, segundo a terminologia convencional, no que muitos autores consideram ser o início da Pequena Idade do Gelo).

Este período do final do século XIII e século XIV foi caracterizado, portanto, pela transição de uma organização climática estabelecida nos séculos precedentes, em que a Terra recebia mais energia solar, para outra em que a energia recebida diminuiu (menos manchas solares), o que fez com que os padrões do clima fossem forçados a reorganizar-se no sentido de se estabelecer novo equilíbrio dinâmico. Como é habitual em períodos de reorganização como este, a frequência de eventos extremos ampliou-se significativamente. Estas modificações foram acompanhadas por perturbações políticas, sociais e económicas, sobre as quais há amplas informações em todo o mundo. Na Europa, como já se referiu, foi uma época de contracção económica e de declínio demográfico (até por causa dos surtos epidémicos a que as novas condições climáticas não são alheias), de que os reinos cristãos apenas começariam a emergir com o início das viagens das descobertas, no final do século XV.

Mais a norte, na Groenlândia, sob influência desta reorganização climática, as colónias vikings entraram em nítida decadência. Alguns trabalhos recentes, entre os quais o de William P. Patterson e co-autores, de 2010, baseados em análises de $\delta^{18}O$ e descrições contidas na literatura viking, permitem perceber melhor a lenta agonia que culminou no desaparecimento destas colónias. Em finais do século XIII e início do XIV (ou seja, quando se iniciou a reorganização climática e se verificou o Mínimo de Wolf) verificou-se decréscimo acentuado das temperaturas. Em 1320 as temperaturas médias de Verão e de Inverno eram já cerca de 2ºC inferiores às que aí ocorriam apenas 70 anos antes. A rota marítima entre a Groenlândia e a Islândia, que inicialmente quase não tinha gelo, foi-se tornando cada vez mais difícil devido a este ser progressivamente mais abundante, chegando o mar a gelar, de forma que esta ligação marítima foi abandonada em 1342. As temperaturas continuaram a descer, o que conduziu ao abandono da colónia ocidental da Groenlândia (situada mais a norte) em 1360. Em 1380 parece terem-se atingido as temperaturas mais baixas desde o início da colonização, sendo de 4,5ºC no Verão e de -0,5ºC no Inverno. Um dos últimos registos escritos da colónia sul data de 1408 e refere-se a um casamento na igreja de Hvalsey (e, curiosamente, também a um auto de fé em que foi queimada uma bruxa). Em meados do século XV esta colónia tinha

já perecido. Continuam em debate as razões que levaram ao colapso das colónias da Groenlândia, mas uma das razões principais parece ter sido a malnutrição, devida a drástica redução da produtividade agrícola e insuficiente compensação alimentar com produtos marinhos. Outro factor relevante foi a chegada, à região, dos *Inuit*[1], vindos de norte, que ampliaram fortemente a competição por alimentos, e com os quais os colonos tiveram vários confrontos armados. Assim, entre várias outras, esta modificação climática teve também como consequência dramática a extinção das colónias da Groenlândia.

Foi um período extremamente conturbado caracterizado pelo que, com frequência, se designa por "Trilogia Negra": fomes, pestes e guerras. A instabilidade climática e os eventos extremos associados, nomeadamente com Invernos secos e outros muito chuvosos, bem como Verões muito quentes e outros tépidos, em que por vezes ocorriam chuvadas ou queda de granizo, provocavam aumento da frequência de maus anos agrícolas e, consequentemente, fome e miséria. Adicionalmente, a peste grassava e ampliavam-se as contendas territoriais, de que é exemplo paradigmático a chamada Guerra dos Cem Anos, série de conflitos armados que decorreu entre 1337 e 1453, envolvendo a França e a Inglaterra, a que se juntaram vários outros países. Essa Trilogia Negra, que teve óbvia influência dos factores climáticos, contribui de forma decisiva para o desmoronamento do sistema feudal.

Provavelmente relacionadas com as novas condições climáticas e com a Rota da Seda, estão, também, os surtos epidémicos, designadamente a pandemia que ficou conhecida pelo nome de "peste negra" (ou peste bubónica), e que atingiu o seu pico na Europa em meados do século XIV. Sabe-se hoje que a doença é provocada pela bactéria *Yersinia pestis,* e que é enzoótica (está constantemente presente) em roedores de algumas regiões, nomeadamente nas zonas semi-áridas do planalto tibetano, da Mongólia e da China central, tendo como veículo transmissor a pulga do rato. É possível que, com a organização climática anterior (estabelecida durante o Máximo Solar Medieval), massas de ar mais húmido provenientes de Oeste tenham propiciado o crescimento da vegetação e, por consequência, tivessem feito crescer as populações de roedores silvestres, com as suas cargas de pulgas e consequente quantidade de agentes patogénicos. Há relatos de elevadas mortalidades na região desde finais do século XIII, que se foram expandindo durante a primeira metade do século XIV. Sabe-se que, em 1334, a peste atingiu duramente a província chinesa de Hubei. É provável que os mongóis e as caravanas de mercadores, inadvertidamente, tivessem propagado a praga da Ásia Central para o Oriente Médio e para a Europa.

Os vectores da peste chegaram à Europa, muito provavelmente, de diferentes formas, nomeadamente acompanhando os exércitos mongóis nas suas incursões, transportados pelos mercadores ao longo da Rota da Seda, e nos navios (onde os ratos e, por consequência, as suas pulgas, eram frequentadores habituais) que traziam esses bens para o Mediterrâneo e daí os distribuíam para toda a Europa. Em 1343 a doença tinha atingido a Crimeia, de onde os navios traziam muitos dos produtos da Rota da Seda para a Europa. Em 1344 a sua existência era já relatada nas cidades mercantis de Trebizonda, no Mar Negro, e de Constantinopla, no Estreito do Bósforo, à entrada do Mediterrâneo. Em 1347 atingiu a Sicília, ao que parece trazida por navios genoveses, tendo-se propagado rapidamente por toda a ilha e, a partir daí, para o continente. Entre 1347 e 1349 atingiu duramente o Cairo, onde dizimou entre um terço

---

[1] Designam-se por *Inuit* (palavra que significa povo na língua *inuktitut*) os povos esquimós que habitam as regiões árcticas do Canadá, do Alasca e da Gronelândia. Os *Inuit* vivem em pequenos assentamentos permanentes, e cuja economia se baseia na exploração sazonal de mamíferos marinhos, dos quais extraem alimentos, roupas e combustível.

e metade da população. Destes portos, a Peste Negra propagou-se por toda a Europa, reduzindo a sua população entre 30% a 60%. Segundo algumas estimativas, a população mundial teria decrescido, no século XIV, de 540 milhões para 350 milhões.

A expansão da doença pode, também, ter-se ficado a dever à sua utilização como guerra biológica. O norte-americano Mark Wheelis, da Universidade da Califórnia, e os suíços Vincent Barras e Gilbert Greub, da Universidade de Lausanne, estão entre os vários autores que suportam esta hipótese, principalmente baseados na narrativa "Istoria de Morbo sive Mortalitate quae fuit Anno Domini 1348" do italiano Gabriel de Mussis (*c.*1280 - *c.*1356). Os genoveses estabeleceram-se em Caffa (actual Teodósia, na República Autónoma da Crimeia, na Ucrânia), em 1266, que transformaram num dos seus principais entrepostos comerciais, frequentado pelos grandes navios mercantes de Génova. Em 1384 a cidade foi sitiada pelos mongóis, em cujas hostes grassava a peste. De acordo com a narrativa de Mussis, para abreviar a duração do cerco, os mongóis lançavam, com catapultas, para dentro da cidade sitiada, cadáveres que tinham morrido com a peste, o que fez com que a doença se alastrasse a praticamente todos os habitantes. Os genoveses, a maior parte dos quais doentes, acabaram por fugir nos seus navios em direcção ao Mediterrâneo, neles transportando também, inadvertidamente, ratos e pulgas infectados, assim trazendo a peste para a Europa.

Em Portugal, a peste entrou no Outono de 1348, tendo consequências análogas às do resto da Europa, tendo vitimado entre um terço e metade da população, provocando uma situação caótica. Aliás, a situação levou a que D. Afonso IV (1291-1357) convocasse as Cortes de Lisboa, em 1352. Tal como se verificou na generalidade do espaço europeu, também aqui, a este primeiro surto violento, se seguiram, mais tarde, outros, embora não tão devastadores, nomeadamente uma segunda pandemia, em 1569, e uma terceira, em 1650.

Já no ponto I.5.4.5. discorremos um pouco sobre eventuais causas da proliferação de pandemias durante períodos de reorganização climática, aí pormenorizando um pouco o exemplo a peste bubónica que, em 541 e 542 d.C., se propagou por todo o mundo romano, tendo mesmo atingido a Pérsia e a Índia, e que ficou conhecida como "Peste de Justiniano" por ter ocorrido durante o reinado de Justiniano I (*c.*482-565), imperador do Império Romano do Oriente. Por essa razão, dispensamo-nos de aqui aprofundar mais o assunto.

Assim, a reorganização climática devida à menor radiação solar recebida durante o Mínimo de Wolf, foi acompanhada por profundas perturbações políticas, sociais, económicas e de saúde pública, desde finais do século XIII. Tradicionalmente, estas alterações profundas são descritas como sendo a "crise" do século XIV, mas, perante a magnitude e importância das mudanças que ocorreram, o termo crise parece ser modesto e não suficientemente adequado, pelo que o historiador Bruce Campbell (1949- ...) designou este período por "A Grande Transição".

II.6.4.3. O Mínimo de Spörer e o prenúncio da Pequena Idade do Gelo

Como se viu, o Mínimo de Wolf marca o início da passagem de um período relativamente longo de maior número de manchas solares para outro em que estas eram comparativamente poucas ou quase não existiam, ou seja, efectua a transição entre uma época em que a Terra recebia mais energia solar para outra em que essa energia era menor. Como a energia que do Sol chega à Terra é o grande motor do sistema climático, essa foi uma altura de reorganização do clima, em que a frequência de eventos extremos se ampliou, até se estabelecer um novo equilíbrio dinâmico relativo. Referiram-se, também, as perturbações políticas, sociais, económicas e de saúde pública que então ocorreram, muitas das quais directa mas, na maior parte, indirectamente associadas a tal reorganização climática, ou seja, a "Grande Transição"

entre um clima com determinadas características e uma sociedade adaptada a essas características, para um clima com tipologia algo distinta, suscitadora de uma evolução social que viria a adquirir aspectos diferenciadores.

Essa grande transição climática tem vindo a ser detectada um pouco em todo o mundo. Apenas como exemplo, referem-se as variações de $\delta^{18}O$ identificadas por Matthew D. Jones, da Universidade de *Nottingham*, nas varvas[1] do lago Nar Gölü, instalado numa cratera vulcânica da Capadócia, na Turquia (Figura II.25), e que constituem *proxies* do balanço hidrológico regional.
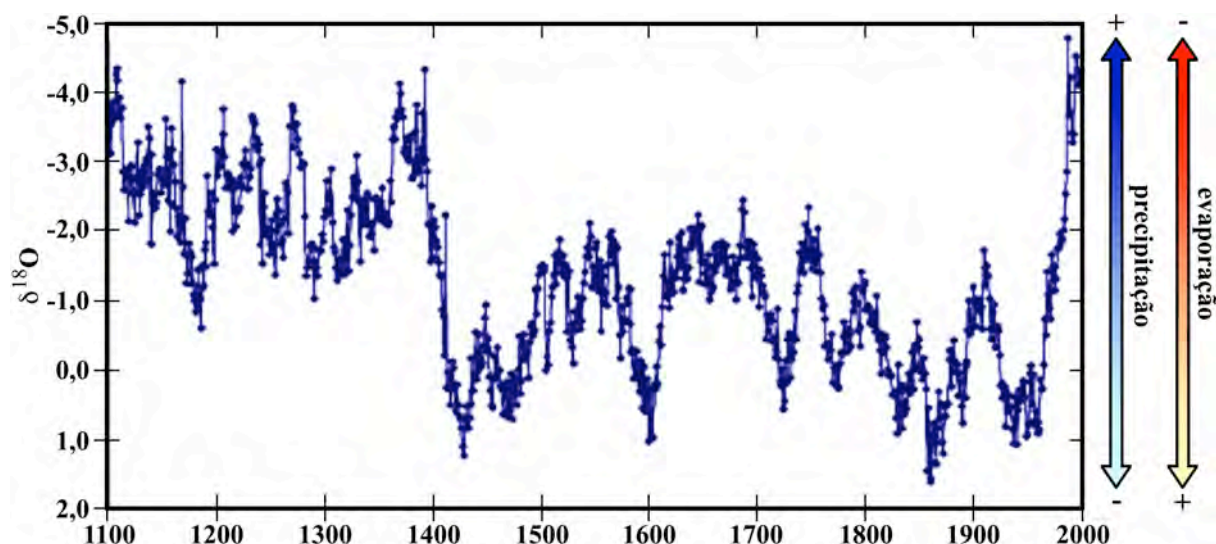
Figura II.25 – Evolução do $d^{18}O$ na coluna sedimentar do lago Nar Gölü, na Capadócia, Turquia, utilizado como proxy da precipitação e da evaporação, os seja, do balanço hídrico da região. Embora a série se estenda por 1700 anos, apenas se representaram os últimos 900 anos, pois que é o domínio em que foi possível ter resolução anual. Para facilidade de leitura da figura inverteram-se os valores de $d^{18}O$ (negativos na parte superior e positivos na inferior).

A Capadócia é uma região semi-árida em que o clima resulta da alternância sazonal entre depressões frontais de média latitude, associadas a massas de ar polares, no Inverno, e sistemas de altas pressões subtropicais que fazem descer massas de ar tropical marítimo e continental durante o Verão. Devido a estas condições, a intensificação das baixas pressões no sul da Ásia faz aumentar as chuvas das monções e fortalece os ventos de Norte e de Nordeste provenientes da Ásia Central, quente e seca, o que induz ampliação das secas estivais no Mediterrâneo Oriental. No Inverno, há influência da NAO, verificando-se que, quando se existe avanço das frentes glaciárias alpinas, o balanço hídrico no lago atinge valores menores ($\delta^{18}O$ positivos), embora pareça haver um certo atraso nesta resposta. Como se referiu, este é apenas um exemplo das muitas reconstituições da evolução de vários parâmetros climáticos que já existem em quase todos o globo, que geralmente revelam as grandes instabilidades ocorridas na segunda metade do século XIII e durante o século XIV, instalando-se uma nova

[1] Designam-se varvas as camadas de sedimento que se depositam a um ritmo anual, sendo sinónimo de laminação anual. O termo provém do sueco *varv*, que significa "círculo", "revolução", "em camada". Inicialmente, o termo surgiu em 1862 no primeiro mapa produzido pelos Serviços Geológicos da Suécia como *Hvarfig lera* (varvas argilosas), sendo aplicado aos sedimentos dos lagos glaciais em que é possível identificar as camadas depositadas anualmente. Porém, no Congresso Geológico Internacional realizado em Estocolmo, em 1910, o geólogo sueco Gerard Jacob De Geer (1858-1943) propôs nova definição, passando varva a designar qualquer camada anual sedimentar.

configuração climática a partir do início do século XV (embora, por vezes, haja alguns desfasamentos, devidos a atrasos nas respostas das teleconexões entre os diferentes sistemas.

É certo que, a seguir ao Mínimo de Wolf, por volta de 1375, ocorreu um pequeno período de aumento do número de manchas solares, por vezes designado por "Máximo Chauceriano" ou "Máximo de Chaucer[1]". Porém, foi um período curto, da ordem de umas duas décadas, que não foi suficiente para repor minimamente a situação vigente no Máximo Solar Medieval, sendo possível que tenha contribuído para certa ampliação dos eventos climáticos extremos. Seguiu-se-lhe um importante período de poucas manchas solares, o Mínimo de Spörer, que se iniciou por volta do ano 1400, mas que foi particularmente intenso entre cerca de 1460 e aproximadamente 1550. Foi a consolidação do que, em geral, é conhecido por "Pequena Idade do Gelo", que se viria a prolongar até ao século XIX.

Em meados do século XIV, de acordo com a reconstrução que temos vindo a seguir (referente à Escócia), a NAO começou a enfraquecer rapidamente e de forma consistente (Figura II.23), embora, noutras reconstruções, esse enfraquecimento ocorra um pouco mais cedo. Tal significa, como já se referiu, que a trajectória dos ventos gerados no Atlântico Norte começou a rodar, deixando de seguir um percurso com componente NW-SE mais forte, para passar a ser dominada pela componente W-E. Também como já se fez referência, estas condições propiciam Invernos mais frios e secos no NW da Europa e mais amenos e húmidos no Norte de África e no SW europeu.

Progressivamente, com a persistência das novas condições, foi-se estabelecendo uma nova organização climática, a que as sociedades tiveram que se adaptar. A peste negra tinha amortecido fortemente de intensidade (embora continuassem a existir surtos, mas nunca voltando a atingir o elevadíssimo grau com que atacou no século XIV), mas a devastação que tinha provocado influenciaria de forma marcante as sociedades pelo menos nos três séculos seguintes. Desconhecendo-se as causas e as formas de transmissão da doença, as populações reagiram adquirindo, por um lado, um renovado fervor religioso e, por outro, enveredando por um fanatismo e por práticas xenófobas com que pretendiam proteger-se de novos surtos (e de novos contextos político-sociais a que ainda não estavam habituados). Em várias regiões da Europa, partindo do princípio que os culpados da propagação da pestilência (e das novas ideias que iam surgindo) eram os grupos sociais não devidamente integrados na comunidade, verificou-se a perseguição, entre outros, de judeus, ciganos, mendigos e estrangeiros. Não se conhecendo bem as características da doença, sendo difícil ou impossível distinguir doenças diferentes, também os leprosos, mas mesmo outros indivíduos com doenças de pele, como o acne e a psoríase, foram discriminados e, muitas vezes, confinados a áreas específicas (por exemplo, leprosarias).

Com uma população fortemente diminuída devido à peste, os desequilíbrios sociais e das estruturas produtivas tornaram-se evidentes. Perante a falta de braços para as tarefas agrícolas, os trabalhadores conseguiram adquirir maior autonomia, podendo, com frequência, vender a sua força de trabalho para outros proprietários que estavam dispostos a pagar mais, conseguindo, assim, libertar-se do trabalho obrigatório para os senhores das terras a que estavam adstritos. Estioladas as antigas redes comerciais globais, novas malhas mercantis iam sendo ensaiadas.

[1] A designação é uma homenagem ao poeta inglês Geoffrey Chaucer (1343-1400), que, como era habitual na altura, se interessava também, entre outros assuntos, pela filosofia e pela astronomia. A obra mais conhecida de sua presumível autoria são "Os Contos da Cantuária" (The Canterbury Tales), escritos a partir de 1387, que alguns investigadores defendem ter referências a episódios climáticos ocorridos na altura.

No último quartel do século XV, sob as novas condições climáticas, ambientais, sociais e comerciais, num mundo redefinido e com perspectivas alargadas (onde o Renascimento começava a emergir), e em que se voltava a registar crescimento demográfico significativo, verificou-se, de novo, crescimento económico. Neste novo contexto, de certa forma mais integrador, em que se verificava desanuviamento da Trilogia Negra (fomes, pestes e guerras), em que as cidades começavam a crescer, e em que se constatava a emergência da burguesia como nova força económica, havia necessidade de ter uma governação e administração do território mais eficazes, pelo que, a pouco e pouco, iam sendo tomadas medidas nesse sentido: era o prenúncio da construção do que, com frequência, se designa por "Antigo Regime"[1].

Como se disse, a nova organização climática estava estabelecida, embora persistisse a forte variabilidade que está, sempre, associada ao clima. Também como se referiu, os princípios de um novo tipo de sociedade (incluindo as componentes políticas, económicas e outras) tinham-se também desenvolvido. Pode dizer-se que as bases da sociedade da Idade Moderna[2], em que o modo de produção feudal foi paulatinamente substituído pelo modo de produção capitalista, se estabeleceram durante o Mínimo de Spörer.

Pode considerar-se que o Mínimo de Wolf (iniciado em finais do século XIII e que se prolongou até meados do século XIV), bem como o Máximo Solar (Máximo de Chaucer) que se lhe seguiu e o separou do Mínimo de Spörer, corresponderam a um período de reorganização climática em que o sistema global tendeu a adaptar-se a uma menor quantidade de energia recebida do Sol. Durante o longo e intenso Mínimo de Spörer, que se prolongou mais ou menos entre meados dos séculos XV e XVI, o sistema climático já se tinha adaptado às novas condições, e as sociedades ocidentais estavam a transmutar-se no sentido da construção de uma nova ordem socioeconómica. O crescimento económico, em muito impulsionado pela afirmação de uma burguesia, inicialmente quase incipiente, mas que se foi tornando cada vez mais activa, preponderante e forte, ressurgiu em quase toda a Europa. Foi o que se verificou, entre outros, em Itália, Inglaterra, Espanha, Portugal e Holanda.

No século XV, a diferente organização das condições climáticas (já mais ou menos estabilizadas), os índices demográficos crescentes, uma estrutura económica renovada, uma burguesia que se tentava impor de forma cada vez mais activa e marcante, e a revolução intelectual advinda do Renascimento, convergiram na adopção, entre outras, de novas ideias, novas posturas, novas políticas e novos tipos de comércio. As trocas comerciais marítimas intensificaram-se. Na Península Ibérica, onde a NAO enfraquecida (figura II.23), proporciona, em geral, Invernos chuvosos e amenos, conduzindo a frequentes anos de boas colheitas, havia nessa altura condições para o país prosperar. Como é sabido, foi então que se iniciou a expansão portuguesa, cujo marco de partida foi a Conquista de Ceuta, no Norte de África, em

[1] Originalmente, "Antigo Regime" foi o nome dado pelos revoltosos, ao regime político que vigorava em França até ser derrubado pela Revolução Francesa (1789) e a proclamação da Primeira República (1792), e que tinha sido instituído a partir do século XV. Porém, foi consignado na historiografia em 1856, por Alexis de Tocqueville (1805-1859), de seu nome completo Alexis-Charles-Henri Clérel de Tocqueville, na obra *L'Ancien Régime et la Révolution*. O Antigo Regime resultou de muitos anos de construção de um estado centralizado, de actos legislativos com frequência reforçadores do poder, mas também de conflitos internos e guerras civis. Esta designação começou, posteriormente, a ser utilizada, noutras regiões europeias que se caracterizaram, na altura, por regimes semelhantes.

[2] Designa-se por Idade Moderna o período da História do Ocidente cujo início é tradicionalmente marcado pela tomada de Constantinopla pelos turcos otomanos, em 1453, e findou com a Revolução Francesa, em 1789. Todavia, muitos historiadores consideram outras datas para o início da Idade Moderna, nomeadamente a Conquista de Ceuta pelos portugueses, em 1415, a chegada de Cristóvão Colombo à América, em 1492, ou, mesmo, a viagem de Vasco da Gama à Índia, em 1498.

1415, com a qual se assegurou o controlo das rotas marítimas de comércio entre o Atlântico e o Levante. Sob o impulso forte do Infante Dom Henrique de Avis (1394-1460), seguiu-se, como se sabe, uma expansão que se viria a alargar a todo o globo, e que conduziu ao apogeu comercial português. Esta expansão, foi seguida, a breve trecho, pela expansão marítima de Castela / Espanha. Juntas, conduziram ao que, muitas vezes, se designa por "Primeira Globalização". Em que medida o regime de ventos (bem como de correntes superficiais e de circulação termohalina) associado à nova organização climática que tem vindo a ser aludida influenciou estas navegações de e para a Península Ibérica, é assunto que não está ainda devidamente esclarecido.

Os outros países europeus chegaram com atraso significativo à utilização do mar como forma de expansão e de enriquecimento, encetado, como se referiu, pelas potências ibéricas. Com efeito, em Inglaterra, na França e na Holanda, não havia, ainda, quando Portugal partiu à conquista do mar, uma monarquia centralizada que fosse aliada dos interesses das respectivas burguesias, além de subsistiam algumas resistências feudais. Além disso, em Inglaterra e em França havia o forte desgaste da Guerra dos Cem Anos (1337-1453), a que se seguiu, na Inglaterra, a Guerra das Duas Rosas (1455-1485), série de lutas dinásticas pelo trono da Inglaterra, apenas retornando à paz em 1485, com o início do reinado de Henrique VII (1457-1509). A Holanda estava, na altura, dividida em diferentes condados, sendo frequentes os conflitos armados, apenas adquirindo alguma estabilização com a união designada por República das Sete Províncias Unidas dos Países Baixos, em 1581.

Na realidade, os cerca de quase cem anos que durou o Mínimo de Spörer, ou seja a metade final do século XV e a inicial do XVI, foram absolutamente estruturantes nas sociedades ocidentais. Foi o período em que o mar como via de comunicação começou a ser intensamente utilizado para aceder directamente a matérias-primas, metais preciosos, especiarias e outros bens de territórios ultramarinos. Associados aos interesses comerciais e às propensões de construção de impérios coloniais para assegurar tais interesses, estavam sempre presentes estratégias bélicas tendentes a defender as ambições das potências europeias. Porém, tal não era já feito tendo cegamente em vista os interesses económicos. As influências do Renascimento faziam-se sentir de forma crescente por toda a Europa; eram as fases que, geralmente, se designam por *Quattrocento* e *Cinquecento.* Tinha ocorrido, também, uma Grande Transição entre o pensamento tipicamente medieval e o renascentista: o humanismo amadurecia e o Homem preocupava-se com a "descoberta do mundo e do homem". Na realidade, os interesses económicos (e os comerciais, expansionistas e bélicos a eles associados) e o pensamento renascentista criaram sinergias importantes. Quanto mais bem se conhecessem as características (cartográficas, biológicas, geológicas e outras, mas também as humanas e sociais) dos territórios ultramarinos, mais bem se poderiam delinear estratégias de exploração, de defesa e de expansão que assegurassem os interesses das potências europeias.

Como já referiu, não se conhecem bem, ainda, as influências que os factores climáticos tiveram no desenvolvimento das grandes navegações europeias. Porém, Portugal, ao encetar a sua expansão marítima, sendo seguida pela Espanha e, mais tarde (no século XVII), pela Inglaterra, a Holanda e a França, deu início a uma profunda divergência na evolução dos países europeus: na Europa Ocidental, beneficiando do oceano como via de comunicação, desenvolveram-se as potências marítimas, construindo impérios coloniais; na Europa Oriental, sem fácil acesso ao mar, os países desenvolveram economias muito mais continentalizadas. Na realidade, foi o início da "Grande Divergência", expressão criada, em 1996, pelo politólogo estadunidense Samuel Phillips Huntington (1927-2008), da Universidade de Harvard, e popularizada em 2000 pelo historiador Kenneth Pomeranz (1958-…) da Universidade de Chicago, embora utilizada essencialmente para explicar as grandes

diferenças de desenvolvimento entre os países ocidentais e orientais (principalmente a China) no século XIX. Porém, muito provavelmente, essa Grande Divergência enraizou nas divergências que se criaram, nos séculos XV a XVII, entre os países que aprenderam a utilizar a navegação marítima para enriquecer e criar impérios coloniais e os que não tiveram essa possibilidade. Aliás, em trabalho mais recente, de 2013, os economistas Jakob Madsen e Eric Yan, da Universidade de Monash, na Austrália, comparando a evolução que existiu em países tão diferentes como China, Índia, França, Reino Unido, Holanda, Alemanha, Itália, Portugal, Espanha, Japão, Rússia e Turquia, chegaram à conclusão de que, após o período 950-1250 que parece ter sido de razoável estabilidade, a Grande Divergência entre o Oriente e o Ocidente teria começado por volta de 1250; desde essa altura até à Revolução Industrial, no século XVIII, a renda *per capita* mais que triplicou nos países ocidentais, enquanto que, nos orientais, se manteve relativamente estável. Segundo estes investigadores, as principais forças motrizes do crescimento no Ocidente foram a expansão do comércio, o desenvolvimento financeiro, a democratização (que reduziu o poder dos governantes), e a forte ampliação do livre pensamento, que começou com o Renascimento e prosseguiu com a perda de influência da igreja. É interessante comparar as conclusões destes autores com o que conhecemos da evolução climática: o período inicial de razoável estabilidade a que aludem coincide com o Máximo Solar Medieval, em que existiu, também, certa estabilidade climática; referem que a situação (económica) se tornou divergente por volta de 1250, ou seja, mais ou menos quando o número de manchas solares começou a diminuir, dando lugar ao Mínimo de Wolf e à Grande Transição. Depois, a partir do início do século XV, sob uma nova organização climática a que as sociedades ocidentais se estavam a adaptar, verifica-se a utilização do oceano para aceder a matérias-primas, a metais precisos e a força de trabalho, ou seja, o seu aproveitamento como grande incentivador do crescimento económico. Todavia, repete-se, nessa altura (séculos XV a XVIII) a Grande Divergência instituiu-se também na Europa, entre os países ocidentais, que construíram impérios coloniais ultramarinos, e os orientais, com difícil acesso ao mar. Recordemos que se estava na chamada Pequena Idade do Gelo e a navegação no mar a latitudes elevadas era difícil, até porque este gelava com frequência e, no Verão, havia o perigo dos gelos flutuantes; mais a Sul, no Mediterrâneo (e ainda mais no Mar Negro e no Mar de Azov), a competição e as rivalidades eram fortes, tornando o acesso ao Atlântico difícil e perigoso.

O período da expansão marítima ibérica (e de outros países da Europa Ocidental), que coincidiu com o Mínimo de Spörer, foi, como se sabe, absolutamente estruturante para as sociedades modernas. Entre as muitas consequências releva-se a do crescimento das cidades costeiras e de litoralização da sociedade. Nos países ocidentais o comércio era efectuado, cada vez mais, por via marítima. As vias continentais de comércio, que antes tinham sido intensivamente utilizadas, foram sendo progressivamente atenuadas, até porque eram mais caras, mais limitadas e mais perigosas, designadamente porque proliferavam os bandos de salteadores. Certo é que o transporte marítimo era, também, arriscado e perigoso, devido, entre outros, aos temporais e às frequentes acções de corso e pirataria, mas acabava por ser mais económico, até pelas grandes cargas que podiam ser transportadas. Portanto, a rede de transportes continentais, que ligavam umas a outras regiões europeias, estava limitada pela relativa pequena quantidade de mercadorias que podiam ser transportadas em cada acção de transporte, mas também porque a diversidade dessas mercadorias dificilmente abrangia, em princípio, bens preciosos a que aristocracia e alta burguesia se tinham habituado. Era por mar que chegavam as especiarias, o ouro e prata das colónias, o açúcar, as espécies vegetais e animais que constituiam novidade e, entre muitos outros bens, a força de trabalho (em geral sob regime de escravatura), de que a sociedade se tinha tornado cada vez mais dependente. Esses bens chegavam, como é óbvio, aos portos, na dependência dos quais se desenvolviam, a

ritmo acelerado, cidades costeiras. Esses bens eram redistribuídos pelas regiões interiores utilizando a rede de transportes terrestres, pelo que, estes, diminuiram de importância e se tornaram apenas complementares ao transporte marítimo.

Portanto, era às cidades costeiras que chegavam os produtos provenientes do outro lado do oceano e, por essa razão, era aí que se desenvolvia a maior parte do comércio em grosso, onde se construiam grandes armazéns para recepção e expedição de mercadorias, onde estavam os cobradores de impostos, onde os indivíduos aguardavam oportunidade para tentar a sua sorte em territórios ultramarinos, onde os marujos compensavam as longas permanências no mar, e onde chegavam notícias de novas terras e de novas oportunidades de negócio. Isto apenas para dar alguns exemplos da intensa actividade que decorria nas cidades costeiras dotadas de porto transoceânicos. Não admira, nestas condições, que a população dessas cidades crescesse rapidamente, e que esses núcleos urbanos se tornassem fortes pólos de atracção demográfica. No interior, agrícola por excelência, escasseavam as oportunidades de progresso e enriquecimento, pelo que muitas pessoas migravam para estas cidades costeiras em busca de oportunidades compensatórias. Foi a primeira grande fase de litoralização da sociedade. Embora o assunto não esteja ainda devidamente estudado, parece ser lícito pressupor que o centro de gravidade demográfica do país se deslocou, aproximando-se cada vez mais do litoral, processo este que prosseguiria nos séculos seguintes, com três fases muito marcantes: primeiro a industrialização (com as fábricas localizadas preferencialmente nessas cidades, por onde chegavam as matérias primas e por onde eram exportados os bens manufacturados); depois, mais tarde, com o advento da vilegiatura marítima (e com a nova moda da aristocracia e alta burguesia irem passar uma temporada junto ao mar); e, finalmente, com o boom turístico dos anos 60 do século XX (especialmente vocacionado para o turismo de Sol e praia, beneficiando dos novos meios de transporte, o qual deu origem a forte especulação imobiliária e a verticalização das frentes marítimas).

Embora tenhamos vindo a tentar encontrar paralelismos entre a evolução climática devido aos ciclos das manchas solares e a evolução das sociedades, devemos ter sempre presente que o sistema climático é extremamente complexo, e que os forçamentos solares são, com frequência, ampliados ou atenuados por factores endógenos. Como lembram Chantal Camenisch e co-autores num trabalho publicado em 2016, as décadas centrais do Mínimo de Spörer foram caracterizadas, na Europa Central, por Invernos particularmente frios e Verões normais mas húmidos, do que resultou uma sazonalidade muito marcada, que teve impactes na produção de alimentos, o que causou aumento dos preços dos alimentos, provocando uma crise de subsistência e, nalgumas partes da Europa, episódios de fome. Parece, portanto, haver uma relação directa de causa–efeito entre as manchas solares (calor recebido do Sol) e a produção agrícola. Porém, no século XV, parece ter ocorrido, também, actividade vulcânica intensa, com erupções do tipo explosivo consecutivas, entre as quais algumas que foram extremamente violentas, como a de um vulcão cuja localização não é ainda bem conhecida (mas que deixou registos nas colunas sedimentares e em testemunhos de gelo), em 1453, a do Kuwaé, no Pacífico, no arquipélago de Vanuatu, em 1458, a do Ruang, na Indonésia, em 1594, e a do Huaynaputina, no sul do Peru, em 1600. Estas (e outras) erupções deste período têm vindo a ser identificadas em testemunhos colhidos em várias partes do mundo, pois as partículas lançadas na altura para a alta atmosfera dispersaram-se praticamente por todo o globo e acabaram, posteriormente, por sedimentar, deixando níveis reconhecíveis com as técnicas actualmente existentes nos registos estratigráficos presentes tanto nos testemunhos de sedimentos como nos de gelo. Estas grandes explosões vulcânicas têm tendência a provocar "invernos vulcânicos", ou seja, particularmente frios, designadamente porque as partículas em suspensão na atmosfera bloqueiam parte da radiação solar incidente. Porém, são eventos de curta duração: em geral, os efeitos fazem-se sentir durante um ou dois anos, podendo, nalguns

casos extremos, prolongar-se por mais alguns anos. No entanto, sequências de eventos vulcânicos explosivos pouco separados cronologicamente podem conduzir a uma sucessão de "Invernos Vulcânicos", uns mais intensos que outros, mas cujas consequências se podem fazer sentir em períodos um pouco mais prolongados. Portanto, é provável que as condições decorrentes da organização climática estabelecida durante o Mínimo de Spörer tenham sofrido, nalguns anos, agravamento devido à sucessão de erupções vulcânicas que ocorreu nessa altura.

II.6.4.4. A transição entre os Mínimos de Maunder e de Sporer

O Mínimo de Spörer foi interrompido por um período relativamente curto (menos de um século), entre meados do século XVI e do XVII, em que existiram mais manchas solares, mas que foi insuficiente para induzir nova reorganização climática, até porque não se chegou a atingir qualquer tipo de estabilidade. Tanto quanto se sabe, na fase final do Mínimo de Spörer, na 2ª metade do século XVI, o número de manchas começou a aumentar, atingindo um pico (com amplitude bastante menor da dos máximos solares anteriores) logo no início do século XVII, começando de imediato esse número a diminuir durante quase todos esse século, até se atingir o Mínimo de Maunder, entre cerca de 1650 e 1715 (figura II.21), com condições comparáveis à do mínimo anterior. Porém, o relativo aumento de energia solar recebida pela Terra durante a aludida fase de maior número de manchas solares induziu, seguramente, distúrbios climáticos que, no entanto, são difíceis de identificar perante a natural elevada variabilidade associada ao clima. Ao que parece, no que aos impactos socioeconómicos diz respeito, foi "apenas" uma perturbação (com efeitos positivos e negativos, consoante os casos, mas ao que tudo indica com maior incidência de negativos).

Embora não haja ainda um conjunto de dados que permita extrair conclusões devidamente consubstanciadas, é possível que a introdução de mais energia no sistema climático (devido a maior número de manchas solares e, portanto, mais energia radiante recebida pela Terra) no breve período entre os Mínimos de Spörer e de Maunder, tenha conduzido a instabilidades. De facto, essa maior energia é disseminada pelo sistema climático através da redistribuição do calor correspondente por meio da circulação das massas de ar e do sistema de correntes oceânicas, pelo que, com frequência, tal conduz à ocorrência de eventos extremos.

Várias indicações parece apontarem, também, para intensificação dos temporais no mar. O assunto carece, ainda, de estudos mais aprofundados, até porque, muitas vezes, o assunto é genericamente englobado no período, mais vago e mais longo, designado por Pequena Idade do Gelo. Por outro lado, é um tema complexo, pois que, tendo como base os registos escritos, as informações, como é lógico, vão-se tornando mais abundantes à medida que o tempo passa, ou seja, a profusão de informações sobre temporais é maior num passado mais recente, sendo cada vez mais escassas à medida que vamos recuando no tempo. Tal torna a análise de frequências complexa e difícil. No entanto, é bem possível que a este período de relativa instabilidade climática tenha correspondido um aumento da frequência de temporais, os quais, aparentemente, foram usuais durante a generalidade da Pequena Idade do Gelo.

Segundo Brian Fagan, *em toda a Europa*, *os anos 1560-1600 foram mais frios e tempestuosos*, (...) *e ventos consideravelmente mais fortes do que os do século XX. Os temporais aumentaram 85% na segunda metade do século XVI e a ocorrência de tempestades severas aumentou em 400%*. É de relevar que o período assinalado, em que, ao que parece, ocorreram mais temporais fortes (que são, como é evidente, eventos extremos) coincide com a primeira parte da transição entre os Mínimos de Spörer e de Maunder, em que se verificaram mais manchas solares e, portanto, como já se fez alusão, o sistema climático procedeu à redistribuição dessa maior quantidade de energia através da circulação das massas de ar e do

sistema de correntes oceânicas. Recordemos que foi nesta altura, em Julho de 1588, que a chamada Armada Invencível, composta por 130 navios com 8 000 marinheiros e 18 000 soldados, que tinha sido preparada por Filipe II de Espanha (1527-1598) na primeira fase da União Ibérica com a finalidade de neutralizar a influência inglesa nos Países Baixos Espanhóis e reconquistar a hegemonia marítima espanhola, foi derrotada na Batalha Naval de Gravelines, no Canal da Mancha. Nessa batalha, cinco navios da frota foram efectivamente afundados em combate, mas foi no regresso, contornando as Ilhas Britânicas, que cerca de metade dos navios se perdeu devido ao temporal no mar.

II.6.4.5. O Mínimo de Maunder e a fase mais intensa da Pequena Idade do Gelo

Aparentemente, as condições prevalecentes durante o Mínimo de Spörer restabeleceram-se durante o Mínimo de Maunder, mais curto do que o primeiro, sendo objecto de debate se foi ou não mais intenso. Segundo alguns investigadores, este período prolongado de poucas manchas solares correspondente aos Mínimos de Spörer e de Maunder, corresponderia a um Mínimo de Hallstatt no presumível ciclo de cerca de 2 300 anos, havendo autores que aí integram, também, o Mínimo de Wolf e/ou o Mínimo de Dalton. Tal traduz o muito que ainda há para aprender sobre os vários ciclos de manchas solares.

Este mínimo de Maunder correspondeu, segundo os autores, à segunda ou à terceira fase da Pequena Idade do Gelo[1] , que se seguiu, de acordo com interpretações actuais, às fases correspondentes aos Mínimos de Wolf e de Spörer. De facto, a Pequena Idade do Gelo é uma expressão que carece de definição precisa quanto aos seus limites temporais. Embora haja consenso na comunidade científica de que correspondeu a um período de arrefecimento generalizado, o seu início varia, segundo os diferentes autores, entre os séculos XIV e XVI, ou seja, recorrendo à reconstrução dos ciclos solares que temos vindo a seguir (figura II.21), para alguns investigadores teria começado com o Mínimo de Wolf e abrangeria a Grande Transição na terminologia de Bruce Campbell, a que mais acima fizemos alusão, enquanto que, para outros, ter-se-ia instaurado apenas durante o Mínimo de Spörer. Já as divergências quanto ao seu final são muito mais esbatidas, oscilando entre 1850 e o final do século XIX.

Os diversificados *proxies* convergem na indicação de que o Mínimo de Maunder, correspondeu a um período particularmente frio (figura II.24), cujas temperaturas médias de Inverno, na maior parte da Europa e da América do Norte, podem ter chegado a se inferiores a mais de 2ºC relativamente às dos finais do século XX, sendo os Verões, em geral, também, frescos. O Verão de 1641 parece ter sido particularmente fresco, possivelmente o terceiro menos quente dos últimos seis séculos. Estas condições, em que, com frequência, ocorreram eventos climáticos extremos, originaram uma série de secas, enchentes e perdas de colheitas, que directa ou indirectamente estiveram na base de migrações maciças, guerras e revoluções.

---

[1] A expressão "Pequena Idade do Gelo" foi introduzida na terminologia científica pelo geólogo norte-americano François Émile Matthes (1874-1948), embora num contexto algo diferente. Embora já antes o tivesse sugerido (por exemplo, em 1934), em 1939 propôs esta designação para descrever o período dos últimos quatro mil anos em que se verificaram avanços e recuos das frentes glaciárias, análogas, embora consideravelmente mais moderadas, às flutuações glaciárias do Pleistocénico. Na altura, Matthes escreveu: *vivemos numa época de glaciação renovada, embora moderada - uma pequena idade do gelo que já dura há cerca de 4.000 anos*. No ano seguinte, em 1940, Francis Matthes viria a reforçar a ideia, dizendo que *As oscilações dos glaciares dos últimos séculos têm estado, talvez, entre as maiores que ocorreram durante os últimos 4000 anos ... as maiores desde o fim da idade do gelo pleistocénica*. Com a passagem do tempo e o avanço dos conhecimentos, a expressão adquiriu outra contextualização. Assim, o período de avanços das frentes glaciárias do final do Holocénico aludido por Matthes passou a ser referido, em geral, como período Neoglacial, e apenas o mais recente e mais extenso episódio desta actividade glacial é actualmente descrita como a "Pequena Idade do Gelo".

Já antes, no ponto I.5., abordámos vários aspectos da Pequena Idade do Gelo, pelo que, aqui, apenas complementaremos alguns dos aspectos.

A descida de temperatura foi, como se referiu, extremamente significativa. Sendo o índice da NAO predominantemente negativo nesta altura, as diferenças de pressão atmosférica entre o norte do Atlântico Norte [actualmente utiliza-se como referência a Islândia] e a parte central deste oceano [que é referenciada, segundo os diferentes autores, pelas estações dos Açores, ou de Lisboa, ou de Gibraltar] seriam menores do que a média de finais do século XIX e século XX. Tal situação proporcionaria a descida de massas de ar árctico até latitudes mais baixas (como na Grã-Bretanha), trazendo tempo seco e com intenso frio. As consequências ecológicas destas situações que então seriam frequentes, nomeadamente no que à vida marinha diz respeito, não estão ainda bem estudadas, mas é de pressupor que, por exemplo, mamíferos marinhos de águas geladas começassem a deslocar-se até latitudes mais baixas do que as habituais, acompanhando o arrefecimento das águas. Um indicador dessa descida de temperatura, entre muitos outros a que poderíamos recorrer, é-nos dada pelo antropólogo britânico Brian Murray Fagan (1936- …), da Universidade da Califórnia em Santa Bárbara, quando refere, em 2001, que em várias ocasiões, entre 1695 e 1728, os habitantes das Ilhas Orkney, no norte da Escócia, foram surpreendidos ao avistar *Inuit*, em seus caiaques, remando ao largo das suas costas. A vinda, até tão a sul, destes caçadores solitários de baleias, parece revelar, por um lado, que as presas que perseguiam se tinham começado a deslocar até latitudes mais baixas e, por outro, que as condições que existiam nas suas regiões de origem dificultavam essas actividades, devido a congelação do mar. Um pouco mais tarde, em 1756, ainda o gelo que rodeava a quase totalidade da Islândia perdurava durante cerca de 30 semanas por ano. Estes acontecimentos fazem lembrar, de certa forma, os que mais acima foram aludidos, que ocorreram na Groenlândia, no início do século XIV, e que conduziram ao colapso das colónias viking, e onde os *Inuit* também tinham chegado, certamente empurrados pelas condições mais agrestes existentes a norte, nas suas regiões de origem.

Muitos outros indicadores existem que revelam o frio que se instalou na Europa, entre eles os avanços das frentes glaciárias nos Alpes. Apenas como exemplo, e continuando a socorrermo-nos do trabalho de 2001 de Brian Fagan: entre 1627 e 1633 ocorreram sete verões frios e húmidos que, ao não provocarem suficiente fusão estival do gelo, fizeram com que a parte frontal dos glaciares avançasse de forma muito significativa no inverno seguinte. Em Chamonix, entre 1628 e 1630, perdeu-se um terço da terra utilizável devido a avalanches de neve, avanço de glaciares e inundações, ficando os hectares restantes sob ameaça constante. Há registos que revelam que, em 1642, a parte frontal do glaciar de Des Bois avançava *mais de um tiro mosquete todos os dias, mesmo no mês de Agosto*.

Nestes eventos que podemos apelidar de extremos incluem-se, também, os ventos fortes que, em zonas arenosas, mobilizam grandes quantidades de areias, provocando, com frequência, grandes prejuízos. Vários autores têm dado contributos para o assunto mas, sempre apenas como exemplo, referimos dois dos casos aludidos em 1991 pelo climatólogo inglês Hubert Horace Lamb (1913-1997). O primeiro ocorreu em 1694 e é conhecido como o desastre de Culbin Sands, grande área costeira no nordeste da Escócia onde havia importante agricultura. Nesse ano, as areias eólicas *cobriram 16 fazendas, incluindo a casa senhorial e hectares (5000 a mais de 7000 acres) das melhores terras de cereais desta parte da Escócia* (...) *devendo ter sido um rude golpe para a economia local* (...). O acontecimento revestiu-se de *maior gravidade, implicando mais custos e angústia, por ter ocorrido num ano em que, como todos os anos entre 1693 e 1698, no norte da Escócia, as colheitas estavam falhando em geral no país e o grão estava sendo importado dos estados bálticos orientais.* O segundo caso aconteceu também na Escócia, em 1697, mas em Udal, na ilha de North Uist, no arquipélago

das Hébridas Exteriores, onde a acumulação de areias transportadas pelo vento *acabou por obliterar o local que era habitado há 4 000 anos*.

O Inverno de 1697/98 parece ter sido extremamente agreste. Vários investigadores têm tentado averiguar o que se passou nessa altura, em especial no temporal extremamente violento de 1 e 2 de Outubro, entre os quais John Kington, da Universidade de East Anglia, e Gerard van der Schrier e Rob Groenland, do Real Instituto Meteorológico Holandês. Em Inglaterra (como, em geral, em todo o norte da Europa), a década de 1690 foi caracterizada por Invernos rigorosos, com temperaturas médias sazonais inferiores a 3ºC. Após o severo Inverno de 1696-1697, o Verão e o Outono de 1697 foram, também, frios, com valores médios sazonais de 14,3ºC e 8,3ºC, respectivamente. Na realidade, todo esse ano foi caracterizado pelo frio, com uma temperatura média anual estimada em apenas 8,0ºC, ou seja, cerca de menos 1,5ºC relativamente à média da segunda metade do século XX. Em Outubro desse ano de 1697, na Holanda, os rios congelaram particularmente cedo, em Outubro. O referido temporal do início de Outubro desenvolveu-se com extraordinária violência em toda a região. Os registos escritos dão conta do afundamento de grande número de navios, desde Inglaterra até à Noruega. No entanto, uma das consequências mais nefastas parece ter sido a sobreelevação do nível do mar de índole meteorológica[1] (*storm surge* na terminologia inglesa, com frequência também utilizada em português). Tanto na Grã-Bretanha, como na Holanda e na Alemanha, as baixas pressões mas, principalmente, os ventos excepcionalmente intensos de Norte e de Nordeste, e o facto do temporal se ter desencadeado a seguir à Lua Cheia de 30 de Setembro e, portanto, em período de marés vivas, fizeram com que o nível do mar atingisse níveis particularmente elevados nas costas meridionais do Mar do Norte, estimados em 2,5 a 3,0 metros acima das marés altas normais. Portanto, foi deslocando-se neste nível marinho sobrelevado que as violentas ondas do temporal atacaram o litoral, provocando grandes estragos. Na Holanda, os diques foram severamente danificados, tendo, em vários casos, cedido. Por exemplo, na ilha de Texel, ao largo da costa norte dos Países Baixos, a água galgou os diques em mais 50 lugares e, pelo menos num caso, um trecho de 40 metros cedeu por completo. Um terço da ilha ficou inundada. O dique de areia entre as ilhas de Texel e Eijerland foi gravemente danificado, tendo desaparecido numa extensão de mais de 180 metros.

Outros grandes temporais ocorreram nesta época (como em 1671, 1682, 1686, 1694 e nas décadas iniciais de século XVIII), embora o de Outubro de 1697 tenha porventura sido o pior ou, pelo menos, um dos piores. Entre outros temporais memoráveis, o de 26/27 de Novembro de 1703, referenciado por vários autores, entre os quais o australiano Edward Bryant, da Universidade de Wollongong, que atingiu a pressão de 950 hPa e gerou ventos com mais de 170 km/h, que só no Canal da Mancha afundou praticamente todos os navios que o cruzavam, provocando entre 8 e 10 mil perdas de vidas humanas.

[1] Designa-se por sobreelevação do nível do mar de índole meteorológica (*storm surge*) a elevação do nível do mar imediatamente adjacente ao continente devido a dois factores: ventos fortes soprando do mar para terra, o que provoca empilhamento de água junto à costa; e baixas pressões atmosféricas que fazem elevar o nível do mar. Como a superfície marinha é uma superfície livre equipotencial, reage à pressão à semelhança de um barómetro invertido. Com pressões altas o nível do mar desce; com pressões baixas o nível do mar sobe. A cada milibar (hPa) de descida da pressão corresponde uma subida de 10 mm do nível do mar. Porém, com frequência, o efeito mais nefasto (maior elevação do nível marinho) é provocado pelo empilhamento da água junto à costa, o qual, como é evidente, gera elevação do nível do mar tanto maior quanto mais forte for o vento. Estes episódios de *storm surge* podem ser altamente catastróficos. O que ocorreu, em 1970, na Baía de Bengala, no nordeste do Oceânico Índico, provocado pelo ciclone Bhola, provocou a morte de mais de meio milhão de pessoas.

Efectivamente o Mínimo de Maunder correspondeu a um período de clima bastante extremado, principalmente, pelo que os dados existentes indicam, a década iniciada em 1690. Essas indicações provêm um pouco de todo o lado, e sugerem que, a Invernos particularmente frios (por vezes muito tempestuosos), se seguiram Primaveras e Verões também frios relativamente ao normal destas estações. O ano mais frio parece ter sido o de 1695, quando muitos rios do norte da Europa congelaram, mesmo aqueles em que tal acontecimento não era frequente. Este ano de 1695 foi um dos que provocaram o congelamento do Tamisa e permitiram a realização da "River Thames Frost Fair" (a que já fizemos alusão no ponto I.3.3), o que apenas aconteceu umas 25 vezes entre os séculos XV e XIX. Na Islândia, nesta década, ocorreram 8 anos em que os gelos flutuantes atingiram a costa SW (uma frequência absolutamente inusitada, aparentemente única no último milénio), impedindo ou, pelo menos, dificultando extremamente a navegação. As más condições agrícolas e as dificuldades de abastecimento a partir do exterior, fizeram com que parte da população morresse à fome. Aliás, estas condições climáticas e a perda das colheitas fizeram com que a fome se instalasse em todo o norte da Europa (e não só), nomeadamente na Finlândia (que, então, perdeu 30% de sua população), na Estónia (onde se estima que tivessem morrido 20% das pessoas), na Suécia, na Noruega, em Inglaterra, na Escócia, em França e mesmo no norte da Itália.

Porém, é importante resistir à tentação de extrair conclusões que podem revelar ser extemporâneas. Mais uma vez chamamos a atenção para a grande variabilidade temporal e espacial dos fenómenos climáticos. Os exemplos acima aludidos referem-se, todos eles, ao norte da Europa e, como sabemos, devido à actuação da NAO, existe um certo contraste entre a Europa do Norte e a do Sul. No norte, na generalidade, os Invernos entre 1675 e 1715, parece terem sido frios e secos, o que não significa que, devido à referida variabilidade climática, não tenham ocorrido anos ou estações muito húmidas. Esta tendência parece ser oposta à que se verificava antes deste período e ao que passou a acontecer depois. No Sul, embora persistisse o frio, a tendência era para a existência de mais humidade, embora, devido à variabilidade climática intrínseca, tal não tivesse evitado a ocorrência de período de seca. Na reconstrução efectuada em 2001 pelo investigador suíço Jürg Luterbacher e outros colegas europeus, no Mínimo de Maunder, pelo menos na segunda metade, as pressões atmosféricas eram significativamente mais altas no nordeste da Europa, mas abaixo do normal no Mediterrâneo central e ocidental, pelo que as situações de bloqueio eram mais frequentes, induzindo surtos de ar frio na Europa Central e Oriental; as Primaveras eram frias e caracterizadas por um desvio para regiões mais meridionais dos percursos dos temporais das latitudes médias; os Verões na Europa Ocidental, Central e Norte eram mais húmidos e mais frios em relação ao que se verificou no século XX, pois que, como o Anticiclone dos Açores era mais fraco, as frentes polares desciam até posições mais meridionais; no Outono havia pressões significativamente mais altas no norte da Europa e menores na Europa continental e no Mediterrâneo, o que traduz mudança expressiva entre as circulações de Verão e de Inverno. Neste quadro sinóptico, de acordo com o trabalho do finlandês S. Lindgrén e do israelita J Neumann, a década de 1690, em particular o Inverno de 1694-95, foi caracterizada por bastante neve no norte de Itália e na Europa mais para norte, e por cheias em lugares tão afastados como Setúbal, Bordéus e Roma. Aliás, os resultados de vários investigadores convergem na indicação de tempo frio também no sul da Europa, mas com frequência chuvoso, principalmente no Mediterrâneo oriental.

Em Espanha, pelo menos desde a década de 80 do século XX, tem-se vindo a analisar a evolução climática histórica também através da análise de cerimónias rogativas "pro-pluvia" e

"pro-serenitate"[1] Um dos exemplos desse tipo de análise é o trabalho, de 2010, de F. Domínguez-Castro e co-autores, que, através deste método, tentaram identificar mudanças nos padrões espaciais das secas ibéricas durante o século XVII, com base em séries de registos de sete locais dispersos por Espanha: Sevilha, Múrcia, Toledo, Zamora, Saragoça, Catalunha e Bilbao. Os resultados obtidos confirmam o que se tem vindo a referir: que a variabilidade espacial e temporal é elevada. De acordo com os autores, entre 1664 e 1680 (mais ou menos correspondente à primeira parte do Mínimo de Maunder), só se verificaram duas secas generalizadas, uma em 1664, que afectou todos os sete locais cujos registos foram analisados, e outra em 1680, identificada em todas as regiões excepto Bilbao, correspondendo, possivelmente, à mais longa seca verificada em Toledo em toda a série (1506 a 1900). A partir do início do século XVIII até 1730 (ou seja, na segunda parte do Mínimo de Maunder), verificou-se modificação no padrão das secas, passando estas a ser escassas e espacialmente mais limitadas. Porém, é preciso ter em consideração que a precipitação na Península Ibérica (e, portanto, também as secas, nas quais o trabalho aludido está concentrado) tem elevada variabilidade espacial devida à complexidade orográfica e à diversidade de processos atmosféricos que afectam a precipitação. Sabe-se, desde há muito, que a fachada atlântica da Península tem características climáticas diferentes das do interior peninsular e das regiões mais adjacentes ao Mediterrâneo. Refira-se que, na segunda metade do século XVII e primeira do XVIII (portanto, após o Mínimo de Maunder), se começaram a verificar secas regionais bastante mais frequentes. O trabalho referido é, apenas, um exemplo do que tem vindo a ser desenvolvido utilizando os registos escritos como *proxies* climáticos.

Intencionalmente, não nos temos referido especificamente a Portugal, pois que o faremos mais adiante. Porém, é de referir que também no nosso país se tem vindo a desenvolver trabalho relevante na utilização de registos escritos como *proxies* climáticos. Apenas como exemplo, aludimos ao trabalho de 2000, de Maria João Alcoforado e co-autores, incidindo no Sul de Portugal, em que são referidas duas cerimónias *pro-pluvia*, em 1694 e em 1712, e outras duas *pro-serenitate*, em 1684 e em 1708, embora se conclua que a maior parte dos meses de Inverno foram mais húmidos ou 'normais', excepto 1681, 1689, 1693 e 1694, 1711-1712 e 1714-1715. Os resultados obtidos expressam bem a grande variabilidade interanual (Figura II.26) a que repetidamente nos temos vindo a referir. Embora seja evidente tal heterogeneidade, aparentemente parece haver tendência para que, no período considerado, e não obstante as sequências de anos secos, tenha havido alguma preponderância para a ocorrência de anos húmidos, pois que a média dos valores parece ser ligeiramente positiva. Já no que respeita à temperatura, é nítido que este período foi caracterizado por anos tendencialmente frios. Porém, mesmo as médias anuais escondem a própria variabilidade sazonal (também indicada pelos autores referidos). Por exemplo, os Verões no Sul de Portugal são normalmente secos, apenas com raras chuvadas ocasionais, mas no ano de 1701 (extremamente chuvoso) a precipitação foi relativamente intensa, o mesmo acontecendo no Outono (que apresenta os maiores valores de toda a série). Numa sociedade profundamente dependente da agricultura, este excesso de precipitação na altura do amadurecimento e das colheitas tal deve ter sido catastrófico.

[1] As cerimónias rogativas "pro-pluvia" e "pro-serenitate" eram ritos religiosos que, em geral, se expressavam através de procissões, em que se pedia a Deus clemência para atenuar os efeitos dos elementos meteorológicos. As celebrações rogativas "pro-pluvia" realizavam-se quando a falta de chuva punha em perigo as colheitas; as "pro-serenitate" efectuavam-se quando o excesso de chuvas impedia o bom desenvolvimento das culturas e do trabalho agrícola.
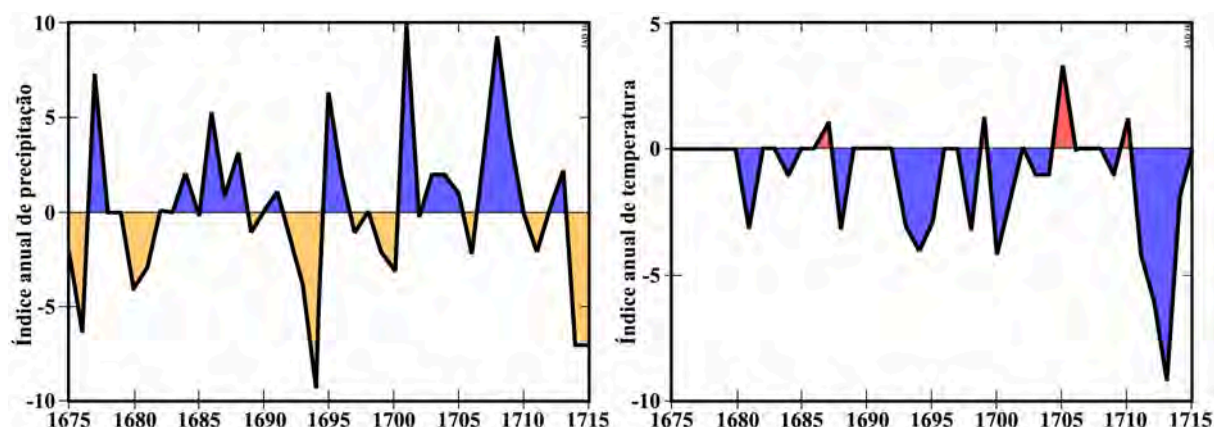
Figura II.26 – Variação interanual da precipitação (esquerda) e da temperatura (direita) no Sul de Portugal, entre 1675 e 1715, abrangendo grande parte do que, em geral, se considera ser o Mínimo de Maunder. Os índices utilizados são função da informação disponível e dependem da intensidade das consequências descritas (informação qualitativa). Esses índices anuais podem variar no domínio entre +12 e -12. O valor 0 refere-se tanto a indicações de que as condições foram normais como a ausência de informação (o que pode significar um ano "normal", pois que nada de anormal ocorreu que fosse considerado suficientemente importante para ser narrado).

Na própria imprensa coeva, bem como em escritos avulsos, são frequentes as referências ao estados do tempo que caracterizaram o Mínimo de Maunder em Portugal, nomeadamente o frio. Apenas de forma exemplificativa das muitas informações existentes, refere-se o "Mercúrio Português"[1] de Janeiro de 1665, onde se relata que *Depois se passou todo o mês* [de Janeiro] *em continuas chuvas e tempestades que não deram lugar a acção alguma* [da guerra da Restauração]. *Na província da Beira foi tal o frio, que na praça de Almeida morreram dele dois soldados estando de sentinela nas guaritas da muralha. E deixando-se de noite à janela vasos com vinho, se achou pela manhã feito caramelo, o que raras vezes se viu em Portugal. E dentro das estrebarias se entortaram as mãos a alguns cavalos com frio, do que pereceram*.

Como se referiu, o Mínimo de Maunder correspondeu a um período em que o número de manchas solares foi diminuto, havendo anos em que não há notícia de ter surgido alguma, o que significa, como vimos, menos energia radiante recebida do Sol. Na parte final do mínimo aludido o número de manchas começou a aumentar, transitando para um máximo relativo (muito inferior aos que presumivelmente ocorreram durante o Máximo Solar Medieval).

II.6.4.6. O Mínimo de Dalton, o fim da Pequena Idade do Gelo e o Máximo Moderno

Ao Mínimo de Maunder, após o acima aludido período de aumento do número de manchas solares (normalmente fala-se em Máximo Solar), sucedeu o Mínimo de Dalton, que, em geral, se considera ter ocorrido entre 1790 e 1820. Porém, a seguir ao Mínimo de Maunder, os máximos e mínimos têm pequenas amplitudes (figura II.21), parecendo integrar-se na transição para o Máximo Solar Moderno. É possível que esta transição se insira no Ciclo de Hallstatt, com periodicidade de aproximadamente 1000 anos (e, a este propósito, lembremo-nos que o Máximo Solar Medieval parece ter-se instalado nos séculos de transição entre o primeiro e o segundo milénios).

---

[1] O "Mercúrio Português" foi o segundo periódico que surgiu em Portugal, sucedendo à "Gazeta", publicada entre 1641 e 1645. O *Mercúrio Português* foi publicado mensal e ininterruptamente entre 1663 e 1667, e era, tal como a *Gazeta*, um jornal de cunho profundamente político, até porque o país estava mergulhado na Guerra da Restauração, e o periódico tendia a legitimar o rei, o governo e a independência reconquistada em 1640.

Não pormenorizaremos a evolução climática neste período, pois que sobre o assunto discorreremos mais à frente. De qualquer modo, é de relevar que, neste período, há já observações meteorológicas fidedignas, que permitem determinar não só as necessárias médias climáticas inerentes à definição do clima e da sua evolução, mas também quantificar a variabilidade interanual. Neste aspecto, é importante tornar a salientar a grande variabilidade climática natural, que a comparação entre os sucessivos estados do tempo e as médias climáticas põem em evidência. Quando, nos pontos anteriores, se falou, por exemplo, em períodos mais húmidos ou mais frios, tal está intrinsecamente ligado à atenuação dos dados individuais inerente à frequente utilização do método das médias móveis (ou outros semelhantes) na análise dos *proxies* seleccionados, o que acaba por ser uma aproximação às médias climáticas. A forte variação interanual sempre existiu, e um bom exemplo disso está expresso na figura II.26.

II.6.5. Forçamento solar, variabilidade climática interanual e eventos perturbadores

As médias climáticas, tal como a suavização dos dados individuais dos *proxies*, tendem a atenuar outros factores endógenos ou exógenos, que, em geral, são de curta duração, mas podem ter consequências meteorológicas e sociais relevantes. Por exemplo, a sucessão anual dos estados do tempo, ou, se assim o quisermos um pouco impropriamente designar, o clima anual é, por vezes, fortemente influenciado por determinados acontecimentos não ligados ao motor básico do funcionamento do clima: a energia que a Terra recebe do Sol, que no curto e médio prazos (dezenas a milhares de anos), parece estar directamente correlacionada com o número de manchas solares. É o caso, entre outros, das erupções vulcânicas do tipo explosivo, a que mais acima já por algumas vezes fizemos alusão, e da queda de grandes meteoritos. Daremos, a seguir, três exemplos destes tipos de eventos, que, nas médias climáticas (de algumas dezenas de anos), quase não têm expressão.

O ano de 1783 foi pródigo em acontecimentos que influenciaram os estados do tempo. Foi um ano com bastantes erupções vulcânicas, nomeadamente as dos vulcões Etna, Stromboli e Vesúvio, na Europa, bem como a do Asama, no Japão, e, principalmente, a do Laki na Islândia. Também nesse ano, na noite de 18 de Agosto, foi visto em toda a Grã-Bretanha e grande parte do noroeste da Europa um meteoro excepcionalmente brilhante, havendo notícias da queda de outros meteoros pelo menos em Agosto, Setembro e Outubro. Esta concentração de eventos levou mesmo o geólogo islandês Sigurdur Steinthorsson (1912-1983) a designar este ano como “Annus Mirabilis”.

A erupção mais relevante verificou-se, entre Junho de 1783 e Fevereiro de 1784, na fissura de Laki (ou, mais correctamente, Lakagígar, que significa “crateras de Laki” em islandês), a qual corresponde a um sector da fronteira divergente entre as placas norte-americana e euro-asiática, uma das únicas do mundo com expressão subaérea. Algumas das plumas de gases e poeiras emitidas atingiram altitudes da ordem de 15 km. Estima-se que tivessem sido libertados 122 milhões de toneladas de dióxido de enxofre (SO_2), mais de três quartos dos quais chegaram à troposfera superior e à baixa estratosfera, entrando nas células de circulação atmosférica (vide ponto I.2.2.3.), acabando por se dispersar por todo o globo, principalmente no hemisfério Norte. Grande parte deste dióxido de enxofre acabou, como é normal, por reagir com a água existente na atmosfera, gerando mais de 200 milhões de toneladas de aerossóis de ácido sulfúrico, que acabaram por ser removidos rapidamente (alguns meses) sob a forma de chuva ácida ou nevoeiros, enquanto que cerca de 10% permaneceram na atmosfera durante mais de um ano.

A neblina causada por esta série de erupções de Laki foi rapidamente registada na Europa e na América do Norte, e em Julho era já noticiada na China. Benjamin Franklin (1706-1790), que

na altura estava em Paris como diplomata plenipotenciário dos recém formados Estados Unidos da América escreveu sobre o assunto (segundo a transcrição efectuada por Lamb em 1970): *Durante vários meses, no verão do ano 1783, quando o aquecimento provocado pelos raios do Sol deveriam ser maiores nestas regiões do norte, existia uma névoa constante ao longo de toda a Europa e grande parte da América do Norte. Este nevoeiro era de natureza permanente; era seco e os raios do Sol pareciam ter pouco efeito para o dissipar* (...) *o inverno de 1783-1784 foi, talvez, o mais severo que ocorreu durante muitos anos*. Há registos desta altura, em vários países europeus, de crises de mortalidade gerados pelas poeiras e gases. Estima-se, que devido a este evento, as temperaturas na Europa tenham descido na ordem de 1 a 2ºC. As mudanças ambientais verificadas em 1783-4 têm sido objecto de muitos trabalhos, constituindo um bom exemplo da colaboração entre investigadores das Ciências Exactas e Naturais e das Humanas e Sociais. Mais adiante, no lugar próprio, pormenorizaremos um pouco mais este interessante caso. O que interessa aqui ressaltar é que, quando integrado em séries longas de dados (por exemplo, 30 anos), os efeitos dramáticos deste *Annus Mirabilis* de 1783 ficam extremamente esbatidos.

Outro caso interessante ocorreu em 1815/16, e refere-se à erupção do Tambora, um estratovulcão[1] existente na ilha de Sumbawa, na Indonésia. Na altura, o cone vulcânico atingia a altitude de cerca de 4 300 metros (a máxima altitude actual é de 2 850 m). Nos dias 10 e 11 de Abril de 1815 o vulcão entrou numa fase de intensa explosividade, dado origem ao que, para a generalidade dos autores, foi maior erupção vulcânica histórica e, também, a que provocou maior mortalidade (88 000 vítimas). A pluma vulcânica atingiu altitudes da ordem de 17 km, com consequências semelhantes ou, provavelmente, mais intensas que as aludidas a propósito da erupção do Laki. Como é frequente acontecer nestes casos, as poeiras estratosféricas absorveram e/ou reflectiram a radiação solar incidente, impedindo que esta atingisse a superfície, provocando o que, muitas vezes, se designa por Inverno Vulcânico. Muitos são os proxies que indicam esta forte anomalia, mas por agora referiremos apenas testemunhos de gelo obtido na Groenlândia, onde se verifica notável aumento de acidez nas camadas acumuladas nestes anos. Antes que a nuvem de poeiras do Tambora tivesse atingido esta região, por certo que a maior parte das cinzas constituídas por silicatos finos caiu até à superfície, mantendo-se apenas os aerossóis, correspondentes principalmente a ácido sulfúrico, cuja sedimentação é bastante mais lenta. Por outro lado, é preciso ter em atenção que a erupção ocorreu no Hemisfério Sul (aproximadamente a 8º 15' S), pelo que o pico do sinal registado nos testemunhos de gelo, obtidos a altas latitudes Norte (por volta de 65º a 73º N), revela um atraso de quase um ano. Vários trabalhos sobre o assunto, entre os quais os de C. U. Hammer e colegas, de 1980, o de Richard B. Stothers, de 1984, e o de Henrik B. Clausen e colegas, de 1997, revelam que, embora em 1815 se tenha verificado já ligeiro aumento de acidez, foi em 1816 que se atingiram os maiores valores, que decresceram em 1817, voltando, em 1818, a níveis comparáveis aos de 1815.

Segundo as estimativas de Richard B. Stothers (1939-2011), do *NASA Goddard Institute for Space Studies*, em New York, o desvio médio da temperatura no Hemisfério Norte foi, em 1816, da ordem de -0,7ºC. Tal parece ser ainda mais significativo porquanto os dados

---

[1] Os estratovulcões têm, em geral, forma cónica, a qual advém da acumulação de sucessivos níveis piroclásticos (fragmentos expelidos para o ar pela erupção, como bombas vulcânicas, cinzas, etc.) e lávicos, correspondentes respectivamente a fases explosivas e efusivas. Como a lava deste vulcões tem, em geral, viscosidade elevada, acaba por arrefecer e solidificar sem atingir grandes distâncias. A actividade explosiva é, com frequência, intensa, depositando grande quantidade de materiais piroclásticos não longe dos locais de emissão. Assim, estes cones vulcânicos são compostos por intercalações de piroclastos e de lavas, razão porque são também apelidados de vulcões compósitos.

sugerem que, entre 1814 e 1819, se verificou tendência de aquecimento, que foi bruscamente interrompida nesse ano de 1816.

Principalmente no Hemisfério Norte (onde a documentação coeva é mais abundante), há profusos registos de anomalias meteorológicas que se verificaram nessa altura. Em Londres, por exemplo, há descrições de pores-do-Sol e crepúsculos excepcionalmente prolongados e brilhantes entre 28 de Junho e 2 de Julho, e mais tarde, entre 3 de Setembro e 7 de Outubro de 1815. Na Europa e na América do Norte, as temperaturas diárias (especialmente as mínimas) foram anormalmente baixas entre o final da Primavera e o Outono, e ventos frequentes de NW provocaram queda de neve e geada no norte da Nova Inglaterra e no Canadá, bem como, Europa Ocidental, ocorrência de fortes chuvadas. Por isso, na maior parte da Europa e na América do Norte, o ano de 1816 foi, do ponto de vista agrícola, desastroso, provocando fome em muitas regiões (segundo muitos autores, a pior fome do século XIX). Devido aos estados do tempo no Verão, completamente atípicas, o ano de 1816 ficou conhecido como o "Ano sem Verão". Recorde-se que, na altura, a Europa estava ainda a recuperar das Guerras Napoleónicas (1803-1815), e a escassez de pão e de outros alimentos acabaram por induzir diversos motins violentos. Esta crise, que se prolongou pelos anos seguintes, embora de forma progressivamente esbatida, provocou migrações em larga escala, nomeadamente de ingleses e alemães, que abandonaram a Europa com destino aos Estados Unidos da América.

Embora as incidências das modificações climáticas e dos eventos meteorológicos em Portugal venham a ser objecto de atenção mais à frente, numa das partes seguintes, adiante-se desde já que as anomalias do ano de 1816 foram também registadas em diversas fontes, sendo disso exemplo o que consta no "Diário Bracarense"[1] de José Manuel Tedim, transcritas em 2002 por José Marques (1937-…), da Universidade do Porto e cónego de Braga: *Em Julho de 1816 foi o mês tanto destemperado tanto* [na] *chuva como no frio, que tendo setenta e oito anos de idade nunca vi semelhante chover e frio, mesmo se fosse nos do próprio Inverno, que fez admirar as pessoas mais velhas que havia no mesmo ano e mês*, acrescentando que *as vindimas duraram até 19 de Novembro, porque as uvas não amadureceram por falta de calor, que houve dias muito frios. Mais de metade não amadureceu, apesar de ter nascido muito*. Esta situação tende a ser confirmada por dados meteorológicos observacionais. Com efeito, em 2008, Ricardo M. Trigo e co-autores, analisando os dados das estações de Lisboa, Madrid, Barcelona e Cádis, chegaram à conclusão que todas essas estações indicam que o Verão de 1816 foi frio, principalmente em Julho e Agosto, os quais, em comparação com o período 1871-1900, tiveram temperaturas entre 2 a 3°C mais baixas do que a média.

Um terceiro caso, da cariz diferente e cujos contornos não são ainda bem conhecidos, principalmente no que se refere às incidências climáticas, é a queda de um meteorito em Tunguska, na região central da Sibéria, na manhã do dia 30 de Junho de 1908, a que mais à frente nos referiremos com mais pormenor (ponto II.7.3.6.). Na realidade, o que aconteceu foi uma enorme explosão (ou série de explosões), cuja energia libertada foi mais de mil vezes superior à da bomba atómica de Hiroshima. Como ocorreu numa região escassamente populada, parece não ter provocado vítimas. Aliás, é uma área tão remota que a primeira expedição para averiguar o assunto só foi realizada em 1921, embora as duras condições do interior da Sibéria não tenham permitido chegar à área da explosão, o que só foi conseguido

[1] O título completo da obra é "Diário Bracarense das Épocas, Fastos, e Annaes mais remarcáveis, e successos dignos de mençam que succederam em Braga, Lisboa, e mais partes de Portugal e Cortes da Europa. Escripto em fidelissima verdade pelos dias dos mezes por Manoel Joze da Silva Thadim. Presbytero secular, advogado nos Auditorios da Cidade de Braga, e natural da mesma". O nome do autor foi actualizado, em 2002, por José Marques, para José Manuel da Silva Tedim.

com nova expedição, em 1927. O que encontraram foi surpreendente: numa área com cerca de 2 000 km^2 as árvores tinham sido completamente derrubadas, estando deitadas radialmente no sentido contrário ao da explosão, indicando, portanto, o local onde o evento ocorreu. Nesse local da explosão, as árvores estavam de pé, mas sem ramos nem casca, assemelhando-se a uma floresta de postes telefónicos. Embora tenham sido aventadas múltiplas hipóteses para este evento (inclusivamente algumas muito imaginativas, como a explosão de um pedaço de anti-matéria e a desintegração de uma nave espacial alienígena), pensa-se actualmente que correspondeu à explosão e desintegração de um grande bólide[1] (meteorito, asteróide ou cometa), que ocorreu entre 5 e 10 km de altitude. As dimensões do objecto variam, de acordo com as diferentes estimativas, entre 60 e 190 metros. Embora não haja cratera de impacte, é considerado um evento de impacto.

Nos dias seguintes, em muitas regiões da Ásia e da Europa, à noite, o céu parecia brilhante. Há relatos de pessoas conseguirem ler os jornais à meia-noite sem qualquer tipo de iluminação artificial. Nos Estados Unidos da América, em vários observatórios, verificou-se durante alguns meses diminuição da transparência atmosférica devido ao aumento de poeiras em suspensão. Segundo alguns investigadores, a desintegração aludida e a integração quase instantânea de grande quantidade de partículas finas dela resultante na troposfera teria provocado modificações na estrutura da atmosfera, e influenciado as células de circulação. Tal poderia ter funcionado como catalisador do aumento das temperaturas globais. O assunto não está, ainda, bem esclarecido, até porque só se começou a ter a percepção do que aconteceu quase 28 anos depois. Continuam-se a discutir as causas e os contornos da mega-explosão, e os seus efeitos meteorológicos e climáticos só agora começam a ser estudados pormenorizadamente.

Vimos, nos pontos anteriores, que parece existir boa correlação entre os ciclos das manchas solares, a evolução do clima e determinados acontecimentos marcantes da sociedade. Todavia, devemos ter sempre presente que quando suavizamos os dados individuais (diários, mensais ou anuais) através de médias que abrandem vários anos ou algumas dezenas de anos, estamos efectivamente a fazer ressaltar os aspectos da evolução climática, mas a esconder episódios meteorológicos que podem ser muito marcantes. Como se tem vindo a repetir, o grande motor do clima da Terra é a energia que esta recebe do Sol. Porém, vários outros factores intervêm no funcionamento do clima, de que os três casos acima referidos são apenas exemplificativos. No que respeita à evolução climática durante os tempos históricos, é essencial compreender tão bem quanto possível os diferentes ciclos das manchas solares, pois que são a base do motor climático, mas nunca esquecendo a variabilidade intrínseca ao clima e os eventos extremos de diversificados tipos.

---

[1] Do grego antigo βολίς [bolís] = "míssil", "seta", "dardo", através do latim *bolis*. Em astronomia corresponde a um meteoro extremamente brilhante ou a qualquer corpo extraterrestre que colide com a Terra.

II.7. Impactes de corpos celestes

II.7.1. A formação e evolução da Terra por colisões com outros objectos celestes

Sendo um corpo celeste, a Terra deve a sua origem e muito da sua evolução à colisão com outros corpos celestes, sejam estes da dimensão de ínfimas partículas, sejam objectos de grandes dimensões, como outros planetóides. É a história comum a todos os planetas: a nebulosa solar original, devido à sua rotação em torno da estrela em formação (o Sol), adquiriu forma cada vez mais achatada; devido à atracção gravitacional entre os inúmeros elementos presentes nessa nebulosa solar, começaram a constituir-se planetesimais (elementos sólidos maiores) que, orbitando o Sol de formas heterogéneas, atraindo os corpos maiores os mais pequenos, ou seja, colidindo uns com os outros; por acreção, alguns dos planetesimais foram progressivamente aumentando de dimensões, convertendo-se em planetóides e em protoplanetas e, posteriormente, em verdadeiros planetas. Desta forma, o sistema planetário que orbita o Sol ter-se-ia formado, na essência, em cerca de 100 milhões de anos após a constituição da estrela central.

No que se refere à Terra, a segregação do planeta verificou-se, possivelmente, em cerca de 60 milhões de anos, tendo o processo de acreção principal demorado uns 10 a 20 milhões de anos. Assim, pode dizer-se que a Terra nasceu há aproximadamente 4,5 mil milhões de anos. Embora estivesse já constituído como planeta (ou, mais propriamente, como planetóide, com cerca de metade da massa actual), e manifestasse tendência para arrefecimento da sua superfície, o processo de acreção prosseguia através da integração da grande quantidade de materiais que nela caiam, provenientes do espaço.

Há cerca de 4,5 mil milhões de anos, verificou-se enorme colisão de um planetóide (com dimensões semelhantes à de Marte) com a Terra, que, entre outras consequências, originou aumento significativo da massa terrestre, provocou a inclinação do seu eixo rotação e deu origem à formação da Lua. Como se referiu no ponto II.2.1., em 2000, o geoquímico britânico Alexander Norman Halliday (1952- ...), na altura presidente do *Institute of Isotope Geology and Mineral Resources*, em Zurique, baptizou este planetóide com o nome de Teia, em clara alusão à titânide com esse nome, da mitologia grega, mãe de Selene, a deusa da Lua.

À medida que o tempo foi passando, a queda de corpos celestes na Terra (ou seja impactos) continuou intensa, o que significa que foi uma fase activa de crescimento do planeta. Porém, como estes impactos eram muito frequentes, havia tendência para a quantidade desses corpos existentes no espaço se fosse progressivamente reduzindo e, por consequência, que o número de impactos fosse lentamente diminuindo. Assim, desde a fase inicial, há cerca de 4,5 mil milhões de anos até há uns 4,1 mil milhões de anos a quantidade de colisões foi-se muito progressivamente atenuando.

Porém, nessa altura, há uns 4,1 mil milhões de anos, a queda de corpos celestes na Terra parece ter-se intensificado novamente, prolongando-se até há cerca de 3,8 mil milhões de anos. É o que normalmente se designa por "bombardeamento intenso tardio". A dedução desta fase de intensificação da colisão de outros corpos celestes com a Terra provém do estudo de amostras trazidas da Lua, da análise das crateras existentes neste satélite da Terra e, embora um pouco mais tarde, do estudo das crateras existentes noutros planetas e satélites naturais. A teoria mais aceite para explicar esta intensificação na quantidade de colisões é a que, em geral, é designada por Modelo de Nice, pois que foi inicialmente formulada, em 2005, por um grupo de cientistas (K. Tsiganis, R. Gomes, A. Morbidelli e H. F. Levison) de diferentes nacionalidades que colaboravam com o *Observatoire de la Côte d'Azur,* em Nice. Sem entrar em pormenores, referiremos apenas que, de acordo com este modelo, após uns 400 milhões de anos da dissipação inicial da nebulosa solar e consequente constituição dos corpos

planetários, os planetas gigantes (Júpiter, Saturno, Urano e Neptuno), que estariam inicialmente dispostos numa configuração compacta, migraram rapidamente para posições próximas das actuais. Neste processo, o disco de planetesimais exterior às órbitas desses planetas (nomeadamente os do Cinturão de Kuiper[1]) teria sido fortemente desestabilizado, e muitos desses corpos teriam adquirido órbitas excêntricas, que teriam começado a interceptar as órbitas dos planetas internos (Mercúrio, Vénus, Terra e Marte), assim intensificando o número de colisões.

Após o bombardeamento intenso tardio as colisões com corpos celestes prosseguiu, embora em quantidades que foram progressivamente diminuindo, continuando ainda nos nossos dias. As consequências das colisões da Terra com outros corpos celestes, de dimensões muito variadas (desde planetóides até ínfimas partículas), foram absolutamente estruturantes para o nosso planeta. Já mais acima, no ponto II.2.1., aludimos à extraordinária importância que a colisão com o planetóide Teia teve para a estabilização climática da Terra. Mas a chegada de outros corpos celestes ao nosso planetas teve, também, importância estruturante para o clima (e para a vida), não só pela quantidade de gases e água que introduziram no sistema, mas também porque é possível que a vida aqui tenha sido por eles introduzida, além de que, esporadicamente, a queda de um destes objectos maiores provocou grandes modificações climáticas rápidas, como veremos mais à frente.

II.7.2. Efeitos climáticos da colisão com objectos astronómicos

Pode dizer-se que, actualmente, a massa da Terra continua a crescer um pouco com a chegada destes objectos astronómicos. Estima-se que, anualmente, cheguem ao nosso planeta entre 37 e 78 mil toneladas destes materiais, embora a maior parte desta massa corresponda a partículas do tamanho de poeiras. O domínio de variação referente à quantidade de meteoróides que chega à Terra é bastante alargado, pois que tal depende do ponto e da forma como a Terra, ao descrever a sua órbita, intercepta as órbitas desses objectos, com frequência concentrados em "nuvens". Com efeito, todos os anos ocorrem as denominadas chuvas de estrelas cadentes, resultantes da interacção entre a Terra, e o rastro de detritos produzido por um cometa ou asteróide, as quais são designadas por nomes relacionados com o ponto do céu de onde parecem radiar. Temos, assim, entre muitas outras, as Perséiades (que parecem radiar da constelação de Perseus e ocorre geralmente em Agosto, sendo constituída por materiais do cometa Swift-Tuttle, cujo núcleo sólido tem cerca de 27 km), as Leónidas (cujo radiante se localiza na constelação de Leão e se verifica em Novembro, composta por materiais do cometa Tempel-Tuttle), as Eta Aquáridas (que parecem provir da constelação de Aquário e são visíveis em Abril e Maio, que estão associadas ao cometa Halley), ou as Gemínidas (visíveis em Dezembro, que parecem vir da constelação de Gémeos, e são constituídas por detritos resultante da fragmentação do asteróide Faetonte há cerca de um milhar de anos). Como é evidente, se a Terra cruza estas nuvens de detritos numa zona em que a densidade destes é mais intensa, o número de estrelas cadentes é, também, maior. Assim, é bastante elevada a variação interanual da quantidade de meteoróides que entre na atmosfera terrestre.

---

[1] Designa-se por Cinturão de Kuiper (também chamado Cinturão de Edgeworth), a área do sistema solar que se localiza para o exterior da órbita de Neptuno, onde se estima existirem mais de 100 mil pequenos corpos celestes (com 100 a 1 000 km de diâmetro, e alguns maiores). Plutão, com quase 2 400 km de diâmetro, que foi classificado, desde a sua descoberta, em 1930, como planeta, é considerado, desde 2006, como talvez o maior corpo deste Cinturão de Kuiper. A designação advém do astrónomo holandês naturalizado norte-americano Gerard Peter Kuiper (1905-1973), que sugeriu a sua existência em 1951.

De qualquer modo, a quantidade de pequenos objectos astronómicos que anualmente colide com a Terra é, sempre, muito grande. Correspondem, na grande maioria, a poeiras, meteoróides, cometas e, por vezes, asteróides, existindo uma relação inversa entre a dimensão desses objectos e a frequência de tais eventos. Como é evidente, a energia libertada por essas colisões depende da composição, do diâmetro, da densidade, da velocidade e do ângulo com que entram na atmosfera terrestre. Face à frequência, pode dizer-se que os objectos que acabam por impactar a superfície do planeta (meteoritos) são relativamente raros. A esmagadora maioria é consumida ao atravessar a atmosfera.

Com efeito, a maior parte da massa dos meteoróides que entram na atmosfera terrestre é consumida no processo de ablação. A fricção com o ar provoca o seu aquecimento e, portanto fusão e volatilização dos materiais, o que provoca o efeito de bola de fogo com o seu rasto típico (estrela cadente). A grande maioria dos meteoróides é consumida neste processo, ficando o material dele resultante em suspensão na alta atmosfera. Nos corpos maiores, o remanescente da massa que não é assim desintegrada, acaba por impactar a superfície (são os chamados meteoritos), em geral com apenas 1% a 25% da sua massa inicial.

Grande parte do material gasoso que, devido à ablação, é disperso na alta atmosfera, acaba por nela se integrar, alterando, em geral a níveis quase insignificantes, a sua composição. O material sólido (ou que acaba por cristalizar), é coagulado em partículas finas que ficam em suspensão durante semanas a meses (por vezes anos), interferindo na passagem da energia radiante solar que chega à superfície. Assim, os efeitos têm alguns paralelismos com os gazes e partículas emitidas pelo vulcanismo, embora a persistência desses efeitos seja, na grande maioria dos casos, efémera. Todavia, tendo em consideração a grande quantidade de pequenos meteoróides que entram na atmosfera, os efeitos cumulativos podem ser consideráveis, embora o assunto não tenha sido, ainda, devidamente estudado em pormenor.

Estima-se que cheguem à Terra, anualmente, entre 18 mil e 84 mil meteoróides com massa superior a 10 gramas. Como se referiu, a quase totalidade é consumida ao atravessar a alta atmosfera, raros sendo (talvez apenas 5 a 10 por ano) os que subsistem a essa travessia e chegam à superfície terrestre, convertendo-se, portanto, em meteoritos. Ao colidirem com a superfície, abrem frequentemente uma cratera, cuja dimensão depende do tamanho, da composição, do ângulo de incidência e do grau de fragmentação do meteorito. As crateras meteoríticas mais frequentes na Terra foram causadas por meteoritos férricos, que são os que mais facilmente transitam pela atmosfera perdendo menos massa. Porém, o número de crateras meteoríticas reconhecidas é relativamente reduzido (talvez apenas pouco mais de duas centenas), pois que aproximadamente 70% dos meteoritos caiem no oceano, e porque as mais antigas foram obliteradas ou destruídas por processos de geodinâmica externa (como erosão e soterramento por camadas sedimentares) ou interna (como subducção, vulcanismo e soterramento por mantos lávicos). Tendo em consideração a idade das formações geológicas e as taxas de erosão, crê-se que apenas tenham sido descobertas até agora cerca de 10% das crateras com mais de 10 quilómetros produzidas nos últimos 100 milhões de anos.

Estima-se que objectos astronómicos com diâmetros da ordem de 20 m atinjam a Terra cerca de duas vezes a cada século, podendo induzir consequências meteorológicas (regionais ou globais) que podem atingir bastante relevância. Todavia, esporadicamente, o nosso planeta é atingido por asteróides bastante maiores. Estima-se que, em média, objectos com diâmetro da ordem de 1 km atinjam a Terra a cada 500 000 anos, e que a colisão com asteróides com cerca de 5 km ocorra em média a cada vinte milhões de anos. É de relevar que estudos recentes, apoiados em bases de dados bastante mais completas, provenientes das informações obtidas nos últimos anos com novas tecnologias, tendem a reduzir as periodicidades aludidas. Por outro lado, é de ter em atenção que estamos a falar de médias e que, portanto, um evento

destes pode ocorrer a qualquer momento, provocando alterações climáticas que podem atingir proporções catastróficas.

Quando um asteróide ou um cometa atinge a Terra, os detritos são ejectados a velocidades da ordem de 50 vezes a velocidade do som, há toneladas de rocha que são vaporizadas e abre-se uma cratera que, nalguns casos, pode ter muitos quilómetros de diâmetro. São eventos extraordinariamente rápidos, cuja duração é de, apenas, alguns segundos, mas cujas consequências se podem fazer sentir no clima durante anos, e modificar a história biológica do planeta. Com efeito, a produção de crateras de impacto é um processo geológico específico e singular, em que grandes quantidades de energia (por vezes equivalente a dezenas, centenas ou, até milhares de bombas atómicas) são liberadas quase instantaneamente, em áreas de pequenas dimensões. Como já se referiu, a quantidade de energia libertada depende, principalmente, da velocidade, do tamanho e da composição e densidade do corpo impactante. No caso de asteróides com massa inferior a um milhar de toneladas, a velocidade média com que entram na atmosfera é superior a 25 km/s, mas vai desacelerando à medida que a atravessa (e esta se torna mais densa), perdendo, neste processo de atravessamento, parte da sua massa original (que é volatilizada e/ou fragmentada, ficando muitos dos materiais em suspensão), acabando por impactar a superfície com cerca de metade da sua velocidade inicial. No caso de asteróides com massa superior a um milhar de toneladas, a velocidade inicial é semelhante, mas a redução de velocidade ao atravessar a atmosfera é muito menor, tal como a redução percentual da massa original, o que acaba por originar um impacto muito mais energético.

A pressão e o calor gerados por grandes impactos fundem e vaporizam tanto o material do meteorito (pelo que, com frequência, dele não são encontrados fragmentos nestas grandes crateras de impacto), como as rochas da crosta terrestre atingida, alterando essas rochas, provocando o que é designado por metamorfismo de choque. Com frequência, nos grandes impactos, a abertura da cratera é acompanhada por ejecção de materiais para a atmosfera, onde parte fica em suspensão, acabando por reforçar o efeito climático provocado pelas partículas aí deixadas durante a travessia atmosférica do meteorito.

II.7.3. Alguns impactos de corpos celeste

II.7.3.1. A extinção em massa do Cretácico – Paleogénico e a cratera de Chicxulub

A extinção em massa do Cretácico – Paleogénico, simbolizada por K-Pg[1], também designada por Cretácico – Terciário[2] (K-T), que ocorreu há cerca de 66 milhões de anos, foi um evento que provocou a extinção de cerca de três quartos das espécies biológicas da Terra, entre as quais as de dinossáurios. Esta transição está marcada em quase todo o mundo, quer em terra, quer no mar, por uma camada fina de sedimentos, em geral do tipo argiloso, que normalmente é designada por "limite K-Pg". Muitas foram as hipóteses formuladas para explicar tal extinção em massa, entre as quais modificações climáticas bruscas ou graduais, bem como

[1] "K" da primeira letra da palavra alemã *Kreide* (cré, uma espécie de calcário branco) que tipifica muitas das formações do Cretácico, pelo que esta letra simboliza este período geológico. "Pg" é utilizado como abreviatura de Paleogénico.

[2] Terciário era o nome dado ao período geológico que decorreu entre há 66 e 2,58 milhões de anos, ou seja, após a Era Mesozóica até ao Quaternário. Porém, a Comissão Internacional de Estratigrafia decidiu, há alguns anos, abandonar esta designação, substituindo-o por Cenozóico, que integra os períodos Paleogénico (entre 66 e 23,03 milhões de anos), Neogénico (entre 23,03 e 2,58 milhões de anos) e, mais recentemente, o Quaternário (entre 2,58 milhões de anos e a actualidade). Porém, o termo Terciário continua a ser ainda amplamente utilizado.

oceanográficas e atmosféricas devidas a causas não determinadas, mas que poderiam envolver vulcanismo intenso, inversões do campo magnético, a explosão de uma supernova nas proximidades do sistema solar, ou cobertura da superfície oceânica por água doce proveniente de um presumível lago árctico. Porém, durante muito tempo, não se conseguiu obter o mínimo consenso quanto às possíveis causas.

Em 1980, uma equipa norte-americana constituída por Luis Walter Alvarez (1911–1988) que, 1968, recebeu o prémio Nobel de Física, seu filho Walter Alvarez (1940-…), Frank Asaro (1927-2014) e Helen Vaughn Michel (1932-…), da Universidade da Califórnia em Berkeley, constataram que os teores dos elementos do grupo da platina (platina, irídio, ósmio e ródio) são muito menos abundante na crosta terrestre e no manto superior do que nos condritos[1] e material primitivo do sistema solar. Assim, concentrações destes elementos em sedimentos parecem indicar fluxos de material extraterrestre, como acontece em calcários formados em águas profundas e actualmente expostos em formações geológicas superficiais, como acontece, entre muitos outros, na Itália, na Dinamarca e na Nova Zelândia, cujos teores em irídio são cerca de 30, 160 e 20 vezes superiores aos dos níveis de fundo (outras rochas próximas), calcários esses que datam precisamente da altura em que se verificou a extinção em massa do Cretácico – Paleogénico, há aproximadamente 66 milhões de anos. Com base nestas constatações, formularam a hipótese de que, nessa altura, a Terra sofreu o impacto de um grande asteróide; em virtude desse grande impacto, teriam sido injectados na atmosfera grandes quantidades de partículas (rocha pulverizada), correspondentes a cerca de 60 vezes a massa do objecto impactante. Uma parte destas partículas teria ficado em suspensão na estratosfera durante vários anos, tendo sido distribuídas por todo o globo pela circulação atmosférica. Essa "nuvem" de partículas teria impedido que grande parte da radiação solar atingisse a superfície, provocando escuridão e frio (um inverno meteorítico), que reduziu em muito a fotossíntese, o que, por ruptura das cadeias alimentares, fez com que a maior parte da vida se extinguisse. De acordo com as estimativas dos autores, o diâmetro deste asteróide seria da ordem de 10 a 14 km.

A hipótese de Alvarez (como normalmente é conhecida) mereceu aceitação por grande parte da comunidade científica. Porém, era preciso encontrar mais argumentos, inclusivamente identificar o local do impacto, o que era problemático. Em 1978, os geofísicos Glen Penfield e António Camargo, que efectuavam, na parte norte da península de Iucatão, uma prospecção magnética aérea para a Pemex (Petróleos Mexicanos), encontraram uma estrutura simétrica em arco que poderia corresponder a parte de uma cratera de impacto. Já anos antes, Robert Baltosser, também ao serviço da Pemex e baseado em dados geofísicos, tinha encontrado, noutro local da península, uma estrutura semelhante. Estes dois arcos sugeriam a existência de uma estrutura circular, com cerca de 180 km de diâmetro, cuja parte central se localizava nas proximidades da aldeia de Chicxulub, e poderia corresponder ao impacto de um grande meteorito. Contudo, não havia quaisquer evidências concretas de que, na realidade, se tratava de uma cratera de impacto, até porque a amostragem proveniente de poços de prospecção de petróleo se tinha, aparentemente, perdido.

---

[1] O nome provém do grego antigo χόνδρος [khóndros] = "grão"; "cartilagem" + sufixo "ito" que forma os nomes de rochas e minerais. Significa, portanto, rocha com grãos (côndrulos). Os condritos são meteoritos rochosos que não foram modificados devido a fusão ou diferenciação do corpo de origem. Contêm côndrulos, isto é, esférulas de dimensão milimétrica de minerais ricos em silicatos, como a olivina e a piroxena, e inclusões ricas em cálcio e alumínio, pelo que são interpretados como resultado de impactos violentos entre asteróides formados por condensação e aglomeração de poeiras cósmicas existente na nébula que viria a dar origem ao sistema solar. Diferenciam-se dos acondritos, que também são meteoritos rochosos, mas que não têm os côndrulos aludidos, pensando-se que tiveram origem em corpos planetários já evoluídos (já com costa sólida).

Entretanto, em 1980, foi publicado, como se aludiu, o famoso artigo de Alvarez e colegas, o qual suscitou uma intensa pesquisa de indícios que pudessem comprovar a teoria. A constatação de que existiam, em todo o globo, anomalias de irídio no limite K-Pg iam-se acumulando, bem como outros indícios, como a presença de quartzo de choque[1] e de tectites[2], muitos dos quais se concentravam na Bacia do Caribe. Em 1991, juntando todos os indícios, uma equipa de cientistas liderada por Alan R. Hildebrand (e que incluía, também, além de outros, Glen Penfield e António Camargo) chegaram à conclusão que a cratera resultante do impacto ocorrido à cerca de 66 milhões de anos era, provavelmente, a que existe no norte do Iucatão, mais ou menos centrada, como se referiu, na aldeia de Chicxulub, razão porque, normalmente, é designada por Cratera de Chicxulub. Trata-se de uma cratera circular soterrada por formações mais recentes, com perto de 180 km de diâmetro. Porém, trabalhos mais recentes sugerem que a estrutura com o diâmetro aludido é o da parede interna, e que a cratera completa é bastante maior, da ordem de 300 km.

Este enorme impacto teria produzido, em toda aquela região, efeitos absolutamente devastadores. Tal pode ser atestado, por exemplo, pela camada com cerca de meio metro de espessura, que foi identificada no Haiti (a cerca de 1 800 km de distância, constituída por material ejectado durante o impacto), e pelos depósitos gerados por ondas proximais existentes praticamente em toda a região do Caribe. Mas os efeitos foram globais. Como já se mencionou, a grande quantidade de poeiras, cinzas e outros materiais que foram ejectados para a atmosfera, teriam bloqueado a radiação solar, produzindo um Inverno Meteorítico (também apelidado de Inverno de Impacto). Porém, ter-se-lhe-ia seguido um aquecimento generalizado, pois que, tendo-se o impacto verificado numa região rica em carbonatos, a fusão e vaporização destas rochas teria aumentado entre duas a dez vezes o teor de CO_2 na atmosfera, amplificando muito o efeito de estufa, o que, segundo as estimativas de John D. O'Keefe e Thomas J Ahrens, do *California Institute of Technology*, teria ampliado a temperatura atmosférica global, entre 2ºC e 10ºC durante 10 a 100 mil anos.

As discussões sobre este interessante assunto continuam, incidindo nomeadamente no tipo de objecto celeste que colidiu com a Terra, nas suas dimensões e características, se foi apenas uma ou várias colisões quase simultâneas, bem como nas consequências climáticas que induziu. Por outro lado, o debate continua sobre o conjunto de causas indutoras das mudanças climáticas que provocaram a extinção em massa do Cretácico – Paleogénico.

Com efeito, mais ou menos na mesma altura da colisão, há cerca de 66 milhões de anos, verificou-se, também, intenso vulcanismo, particularmente no planalto de Decão, na parte Centro-Oeste da Índia. Estas erupções foram tão intensas que os múltiplos níveis de lavas basálticas têm espessura superior a 2 000 metros, correspondendo a um volume superior a

---

[1] O quartzo de choque foi descoberto na sequência das explosões nucleares subterrâneas, as quais geram as grandes pressões necessárias para deformar a estrutura cristalina deste mineral, gerando minerais polimorfos (isto é, que têm a mesma composição química mas estrutura cristalina diferente), como a coesite e a stishovite. Em 1959 o geólogo norte-americano Eugene Merle Shoemaker (1928-1997), do *U. S. Geological Survey*, demonstrou que as pressões que se desenvolvem quando se verificam grandes impactos meteoríticos também geram quartzo de choque, como aconteceu na *Meteor Crater*, no Arizona. Assim, a presença destes polimorfos de quartzo permite confirmar que determinadas estruturas correspondem efectivamente a crateras de impacto.

[2] As tectites são fragmentos arredondados de vidro, com centímetros a milímetros de comprimento, que se formam por ocasião de grandes impactos meteoríticos. A energia do impacto provoca a fusão da rocha e ejecção para a atmosfera de fragmentos fundidos, que ao girarem e arrefecerem, adquirem aspecto rolado. O nome provém do grego τηκτός [tēktós] = "fundido". Dispersam-se por uma área alargada, que é função da energia do impacto, podendo ocorrer a centenas ou mesmo milhares de quilómetros do local do impacto. Constituem, portanto, um indício importante de grandes impactos meteoríticos.

512 000 km^3. São os mais extensos e volumosos mantos de lava conhecidos na Terra. Pensa-se que, originalmente, estes mantos lávicos cobririam uma área da ordem de 1,5 milhões de km^2. Não se conhecem os efeitos climáticos que tão extensas erupções tiveram no clima, e em que medida contribuíram, também, para extinção em massa do K-Pg. Porém, é possível que os três acontecimentos (colisão de Chicxulub, erupções do Decão e extinção em massa) que ocorreram em menos de cem mil anos estejam relacionados. Num artigo recente, de 2015, uma equipa internacional liderada por Mark A. Richards explora estas possíveis relações: é certo que as erupções efusivas do Decão já estavam activas bastante antes da colisão de Chicxulub; todavia, o impacto gerou bastante energia sísmica, que se propagou até ao manto superior, o que pode ter sido suficiente para gerar ou intensificar erupções vulcânicas em todo o mundo; desta forma, mais de 70% do material emitido pelas erupções do Decão podem ter sido induzidas pela aludida colisão. Tal tende a ser confirmado por outros trabalhos, como o que foi publicado em 2016 por um grupo de cientistas norte-americanos encabeçado por Sierra V. Petersen que, na ilha de Seymour, na Antárctica, encontraram evidências de mudança climática simultânea com o início do vulcanismo do Decão e, novamente, na sequência da colisão de Chicxulub, o que sugere que as extinções do final do Cretácico se ficaram a dever aos efeitos combinados do vulcanismo e do impacto meteorítico.

Actualmente, embora haja ainda muitos pormenores que precisam de ser mais esclarecidos, a generalidade da comunidade científica tende a reconhecer que a colisão de Chicxulub induziu profundas modificações climáticas de curta, média e longa duração (de meses ou anos a milhares de anos), tendo sido responsável, ou pelo menos tendo contribuído de forma muito relevante, para as extinções em massa que se verificaram na transição do Cretácico para o Paleogénico. Como já se referiu, cerca de três quartos das espécies vivas extinguiram-se nessa altura. Mas, como sempre, o que é mau para uns, é bom para outros. As extinções aludidas constituíram uma janela de oportunidades para os mamíferos, que, nessa altura, tinham diminuta dimensão e importância ecológica quase irrelevante. Perante o desaparecimento da competição e as novas condições ambientais puderam prosperar, diversificar-se e evoluir, acabando, bastante mais tarde, por dar origem aos hominídeos e, depois, ao *Homo sapiens*.

II.7.3.2. O impacto de um asteróide há cerca de 790 mil anos

Outra grande colisão verificou-se, há cerca de 790 mil anos, na Ásia, embora não se tenha ainda identificado a cratera que originou. Porém, o evento é claramente deduzido da distribuição de tectites, que ocorrem em sedimentos desta idade numa região muito vasta, que inclui a maior parte do Sudoeste da Ásia (nomeadamente o Camboja, o Vietname, o Laos, a Tailândia e o sul da China), mas também a Austrália, a Indonésia e as Filipinas (figura II.27). Trata-se do maior campo de tectites existente na Terra, designado normalmente por Campo de Tectites da Australásia. As tectites deste campo, identificáveis por características físicas distintivas, formaram-se, como já acima se fez alusão, na sequência da ejecção para a atmosfera de material fundido pelo impacto, que vai arrefecendo durante a deslocação através do ar, a alta velocidade, em movimento rotatório. A sua composição está essencialmente dependente das rochas que sofreram fusão durante o impacto (o que permite diferenciá-las das tectites de outros campos), e são predominantemente bastante escuras, variando de tamanho desde esferas com menos de 1 mm (designadas por microtectites, até blocos irregulares que, por vezes, chegam a pesar mais de 20 kg (como algumas que têm sido recuperadas no sudeste da Ásia). Com frequência têm formas discoidais, por vezes deprimidas na parte central, que não são comuns noutros campos de tectites. Consoante as regiões onde ocorrem adquirem designações particulares: australites (que existem na Austrália), indochinites (que se encontram na Indochina) e rizalites (provenientes das Filipinas, cujo nome advém do herói nacional filipino José Rizal [1861-1896]).
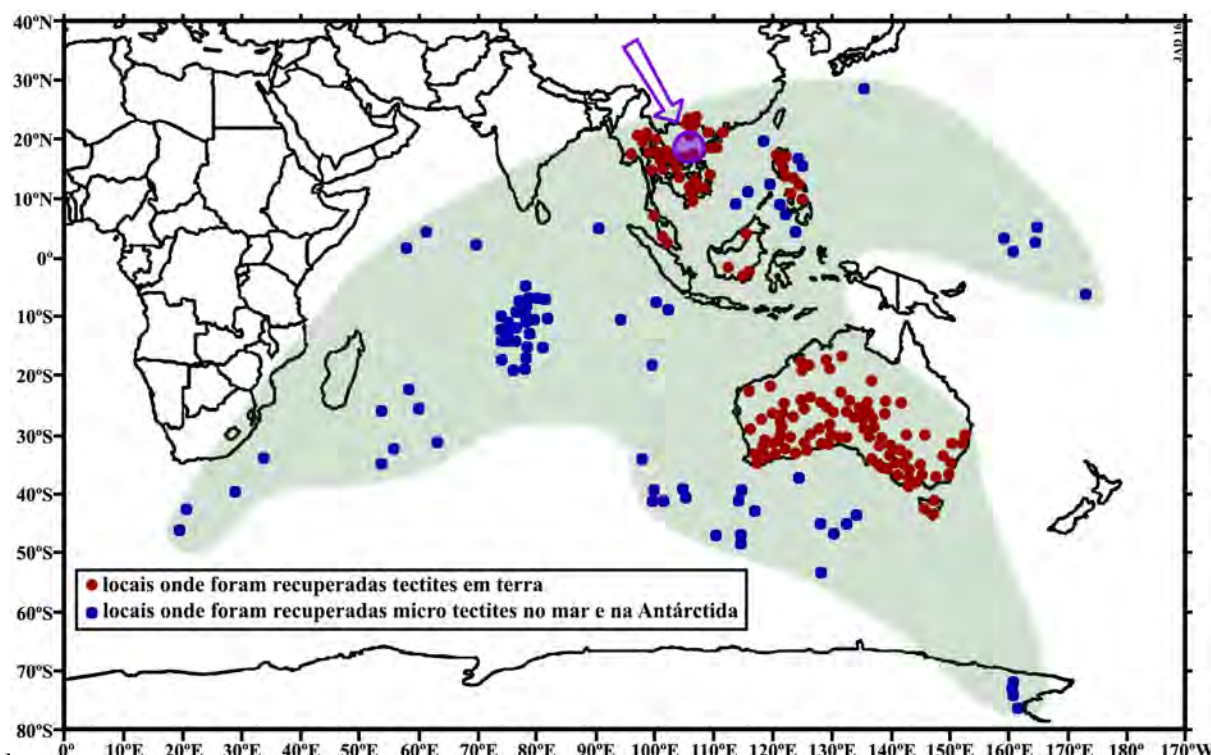
Figura II.27 – Distribuição de ocorrências detectadas de tectites e microtectites do chamado campo da Australásia. A mancha esverdeada representa a presumível área abrangido por este campo de tectites. A circunferência a roxo simboliza o provável local de impacto. A seta a roxo indica a possível direcção de incidência.

Como o impacto se verificou há quase 800 mil anos, estas tectites (figura II.28) encontram-se soterradas por muitos metros de sedimentos, embora, com frequência, a erosão dessas formações as reintroduza no ciclo sedimentar actual, aparecendo à superfície, embora com indícios evidentes da actuação dos processos de geodinâmica externa. Nas bacias oceânicas parecem constituir uma camada fina presente no Índico e no Pacífico. Por exemplo, em trabalho publicado em 1992, uma equipa científica norte-americana liderada por David A. Schneider, reportaram os resultados do estudo de dois testemunhos provenientes de sondagens do ODP[1], uma efectuada no Mar de Sulu, a SW das Filipinas (ODP Site 769), e outro no Mar das Celebes, no Pacífico Ocidental (a sul do Mar de Sulu) (ODP Site 767), onde encontraram níveis decimétricos bem definidos com grandes concentrações de microtectites (com dimensões inferiores a um milímetro) a profundidades respectivamente de 63 e 49 metros abaixo do fundo marinho, onde o número máximo de microtectites atinge cerca de 200 por grama de sedimento, no ODP 769, e quase 300 no ODP 767.

Mais recentemente, em 2008, um grupo de investigadores europeus (principalmente italianos), liderado por L. Folco, do *Museo Nazionale dell'Antartide*, em Siena, divulgaram a

---

[1] O Programa de Perfuração Oceânica, normalmente conhecido por ODP (da designação em inglês *Ocean Drilling Program*), foi um programa internacional dedicado ao estudo da composição e estrutura das bacias oceânicas. Surgiu na sequência do sucesso alcançado pelo projecto norte-americano *Deep Sea Drilling Project* (DSDP), que tinha o mesmo objectivo, iniciado em 1968 e que decorreu até 1983. Portanto, o ODP foi o sucessor, internacionalizado (através de um consórcio que integra vários países, entre os quais Portugal) do DSDP, que decorreu entre 1985 e 2003. Foi seguido pelo *Integrated Ocean Drilling Program* (IODP), que se iniciou em 2003 e está actualmente em curso. Estes programas fizeram já perfurações profundas nalguns milhares de locais distribuídos por todas as bacias oceânicas.

descoberta, nas Montanhas Transantárcticas da Terra de Victória, de microtectites (figura II.28), cujas propriedades físicas e químicas têm afinidades com as da Australásia e idades com elas compatíveis. Encontram-se em acumulações sedimentares localizadas em depressões de intemperismo e em diáclases[1] existentes em vários cumes de montanhas que sofreram erosão glaciária, a cerca de 2 600 m de altitude, e que se distribuem latitudinalmente por cerca de 520 km. Segundo os autores, esta ocorrência poderá corresponder à extensão para Sul do campo de tectites da Australásia, localizado a aproximadamente 2 000 km do presumível local de impacto, possivelmente na Indochina.
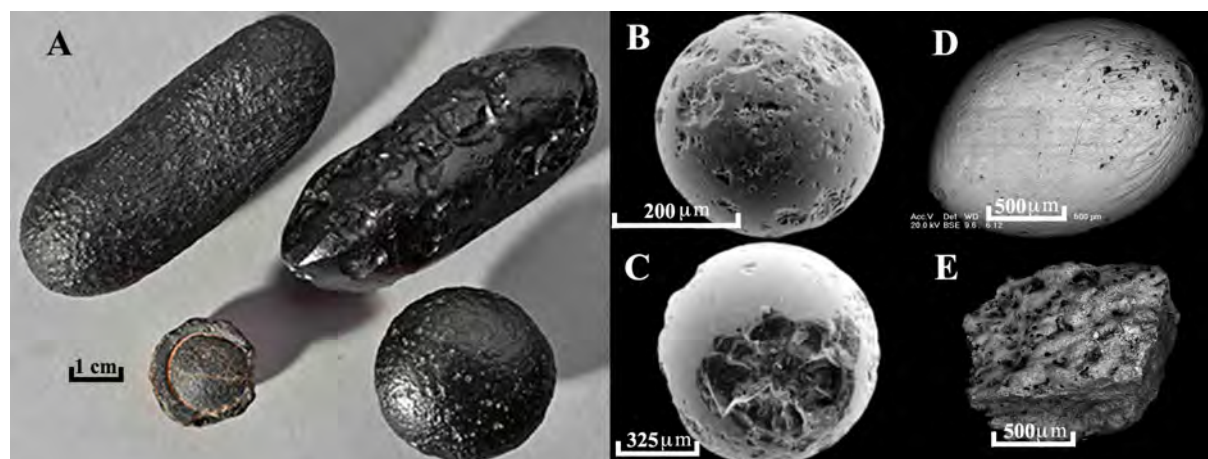
Figura II.28 – Imagens de tectites (imagem A) e de microtectites (B a D) do campo da Australásia. As tectites figuradas em A foram recuperadas na Austrália. As microtectites identificadas com B e C foram recuperadas em testemunhos de sedimentares colhidos no Oceano Índico Central. As microtectites assinaladas com D e E foram encontradas nas Montanhas Transantárcticas da Terra de Victória.

Assim, a dimensão deste campo de tectites da Australásia é imenso. Inicialmente pensava-se que estaria disperso por uma área correspondente a uns 10% da superfície terrestre, mas após a descoberta de tectites deste tipo na África Oriental e na Tasmânia a estimativa elevou-se para cerca de 20%, e com as evidências encontradas na Antárctida, na China e no Tibete , essa percentagem pode subir para aproximadamente 30%, isto é, quase 150 milhões de km^2. A análise do padrão de distribuição, das dimensões e de outras características das tectites permitiram a Aubrey Whymark deduzir, em 2013, que se tratou de um impacto oblíquo, como normalmente são, de um objecto proveniente de Nor-Noroeste, e que a cratera deverá estar localizada no lado oriental da península da Indochina (figura II.27) ou no Golfo de Tonkin, no Mar da China, convergindo neste aspecto com outros autores anteriores.

Os diferentes indícios, principalmente baseados na distribuição das tectites, apontam claramente para um forte impacto ocorrido há cerca de 790 mil anos. Porém, não foi possível

---

[1] As diaclases são fracturas em que não existe movimento apreciável entre os dois blocos. São o tipo de fractura mais comum nas rochas. Formam-se quando as rochas são sujeitas a qualquer tipo de tensão e, também, quando essas tensões deixam de se exercer. Assim, não são só os grandes campos regionais de tensões que geram diaclases. A erosão, ao remover as camadas geológicas superficiais alivia as tensões confinantes das rochas subjacentes, provocando também, muitas vezes, o desenvolvimento de diaclases. Normalmente ocorrem em sistemas, uns que se desenvolvem quando as rochas são submetidas a tensão, e outros que surgem quando essas tensões deixam de se exercer. A intersecção dos sistemas de diaclases conduz, por vezes, à compartimentação da rocha em blocos mais ou menos geométricos. O termo diáclase provém do grego antigo, do prefixo δια [dia] = "através de" + κλασις [klasis] = "fractura", "ruptura", significando, portanto, ruptura através da rocha.

ainda identificar a cratera de impacto, seguramente encoberta por dezenas de metros de sedimentos e possivelmente localizada no fundo do mar. Perante o desconhecimento de mais pormenores, sucedem-se as discussões sobre vários aspectos correlatos. Seria um asteróide ou um cometa? Que dimensões teria? Quais foram as consequências climáticas que induziu? Que alterações provocou nos ecossistemas globais? Como é normal, têm sido apresentadas, ao longo do tempo, várias hipóteses sobre estes assuntos, mas só mais trabalhos de investigação e novas descobertas podem trazer esclarecimentos relevantes.

Alguns autores tentam correlacionar este impacto com a transição do estádio isotópico marinho 20 (glaciário) para o 19 (interglaciário), há cerca de 790 mil anos, embora tal transição pareça poder ser justificada apenas com os parâmetros de Milankovitch (ponto II.5.2.). Outros, assinalam a convergência entre este impacto e a inversão de campo magnético designada por Inversão de Brunhes-Matuyama, ocorrida há aproximadamente 780 mil anos. Estes são apenas alguns exemplos das questões que têm sido levantadas, mas para as quais não há, ainda, respostas satisfatórias. Que um impacto de tal magnitude provocou interferências relevantes no sistema climático e na biosfera, parece ser evidente. Resta saber ainda quais, como e com que magnitude.

II.7.3.3. A Cratera de Barringer (Meteor Crater) de há cerca de 50 000 anos

Porventura a cratera meteorítica mais conhecida é a que existe no Arizona, no SW dos Estados Unidos da América, designada por Cratera de Barringer, mas com frequência apelidada simplesmente por "Meteor Crater" (figura II.29). Resultou do impacto, há cerca de 50 000 anos, de um siderito[1] (cujo nome oficial é "Meteorito de Canyon Diablo", do nome da região onde se situa a cratera) com cerca de 50 metros e que teria massa estimada em bastante mais de 30 toneladas. A cratera, localizada a uma altitude um pouco superior a 1 700 metros, tem cerca de 1,2 km de diâmetro e 180 m de profundidade, tendo uma borda detrítica que se eleva entre 30 a 60 m acima da planície circundante. Foi a primeira cratera de impacto reconhecida cientificamente.

A boa preservação desta cratera de impacto deve-se ao facto de ser relativamente recente, e ao clima de tipo desértico que não induz grande erosão e, portanto, permitiu que as formas originais fossem pouco alteradas. Segundo as estimativas feitas em 1974 pelos norte-americanos Eugene Merle Shoemaker (1928-1997) e Susan Elizabeth Kieffer (1942-…), a borda elevada da cratera teve, até aos nossos dias, uma erosão de 15 a 20 m, enquanto que na parte central da cratera se verificou acumulação de cerca de 30 m de sedimentos lacustres e aluviões, valores estes bastante modestos se considerarmos a idade de aproximadamente 50 000 anos. Sondagens efectuadas no fundo da cratera revelaram que, por baixo dos sedimentos depositados acima referidos, existem 100 a 200 m de arenito constituído por materiais finamente triturados, alguns fundidos e outros com abundância de quartzo de choque (ver nota 1 da p. II.93), bem como por material meteorítico. Nalguns sondagens, a cerca de 180 m abaixo da superfície actual encontrou-se bastante material proveniente do meteorito, principalmente sob a forma de esférulas metálicas finas dispersas em vidro

[1] Sideritos, também designados por meteoritos ferrosos ou metálicos, são meteoritos cuja composição básica é constituída por ferro e níquel. Com frequência chama-se a esta liga "ferro meteorítico". São relativamente raros (menos de 10%) em comparação com os meteoritos rochosos. Em geral correspondem a fragmentos do núcleo de grandes asteróides que colidiram e se fragmentaram. A grande maioria tem origem na cintura de asteróides existente entre as entre as órbitas de Marte e Júpiter. A palavra siderito deriva do latim medieval *sideritis*, que provém do grego antigo σιδηρῖτις [sidērîtis], derivado de σίδηρος [sídēros] = "ferro" + -ῖτις (-îtis) = sufixo que expressa a ideia de "ligado com", "pertencente a", utilizado para formar nomes de minerais ou rochas.

resultante da fusão das rochas. Segundo os cálculos efectuados por Eugene Shoemaker em 1987, a energia cinética necessária para formar uma cratera como esta é equivalente a cerca de 15 mega toneladas de TNT (semelhante à energia libertada pela bomba atómica *Little Boy* largada em Hiroshima em 6 de Agosto de 1945), o que poderia ser conseguido com o embate de um corpo esférico de ferro meteorítico com cerca de 40 m de diâmetro, provavelmente mais se, como é normal e disso há indícios, o projéctil atingiu a superfície num ângulo oblíquo, deslocando-se à velocidade de 20 km/s.

Foram recolhidos, até agora, centenas de fragmentos do Meteorito de Canyon Diablo que deu origem à cratera, o maior dos quais, designado por Meteorito de Holsinger (figura II.X28), com 639 kg, está exposto no museu adjacente. Muitos outros fragmentos grandes têm sido recolhidos, mais de uma dezena com mais de 100 kg, que estão dispersos por museus de todo o mundo.
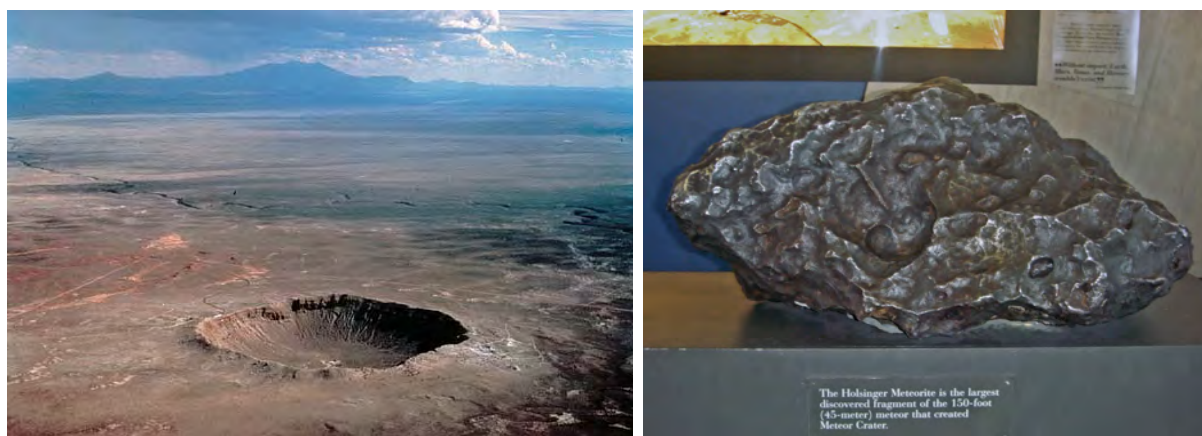
Figura II.X28 – À direita, vista aérea da cratera de Barringer, perto de Flagstaff, no norte do Arizona. À esquerda imagem do o maior fragmento até agora recolhido (designado por meteorito de Holsinger, pois foi descoberto por Samuel J. Holsinger), em exposição no Centro Turístico de *Meteor Crater*, localizado na borda da cratera.

A história do reconhecimento desta cratera como sendo resultante de um impacto meteorítico é interessante, tal como o é a das designações atribuídas à cratera e ao corpo impactante. Embora tal seja lateral ao tema de que temos vindo a tratar, tem relevância, até porque esclarece um pouco os processos científicos. Como foi reconhecido pelo geólogo norte-americano David Allen Kring (1961-…) no Livro Guia para a Geologia da Cratera de Barringer, *a Ciência nem sempre progride de acordo com uma linha recta e raramente a um ritmo constante. Os trabalhos sobre a Cratera Meteorítica de Barringer (aka Meteor Crater) é disso um exemplo clássico. Apesar de uma imensa colecção de meteoritos* [fragmentos] *de origem indiscutivelmente extraterrestre terem sido recuperados na cratera do norte do Arizona, a associação foi considerada, por muitos, uma coincidência e foi preciso que se passassem cerca de quinze anos até que fossem apresentadas provas inegáveis associando os meteoritos à cratera de impacto.*

Uma versão da história da descoberta, embora algo romanceada, foi publicada na revista mensal "The Pacific Monthly", em Abril de 1910, por Will Croft Barnes (1858-1936), funcionário do Serviço de Florestas e Chefe de Pastoreio, que esteve envolvido no processo. É deste artigo que extraímos algumas partes que parecem ser mais relevantes mas, ao mesmo tempo, pitorescas, embora um pouco longas. (...) *no ano de 1889 três rapazes entraram no negócio das ovelhas, no Norte do Arizona. Para localização do seu rancho de criação de ovelhas escolheram o local agora conhecido como planícies de Cañon Diablo Plains, grande extensão com ervas, embora com pouca água* (...). O empreendimento esteve longe de ser um

sucesso. Após alguns anos, como a erva era escassa, *encontraram-se finalmente com um enorme défice nas finanças* (...). *Um dia apareceu no nosso campo de ovelhas um indivíduo grande, com fome, que disse chamar-se Frederick Krapf, de Heidelberg, na Alemanha* (...). *Krapf tomou o lugar de um dos pastores mexicanos e pastoreava as ovelhas, como se tivesse sido esse o trabalho de toda a sua vida* (...). Este Krapf tinha estudado na Alemanha, nas melhores escolas, tendo tirado o curso em Heidelberg, embora não tirasse *da sua educação nenhuma vantagem; era um "vagabundo" constantemente à procura de novas excitações e novas cenas. Sendo um esplêndido geólogo, continuava eternamente à procura de metais preciosos com que a natureza ricamente dotou o Oeste*. (...) *Um dia, no início de Fevereiro de 1891, Krapf regressou ao campo carregado com algumas rochas muito pesadas, de cor escura e formas peculiares. Trabalhou nessas pedras, com o seu maçarico, durante toda a noite* (...). *Na manhã seguinte, quando ia deixar o acampamento com suas ovelhas, chamou-me à parte e disse-me: "Vou levar o rebanho até próximo de Coon Mountain e gostaria que você passasse por lá durante o dia. Quero mostrar-lhe uma coisa*". Quando, mais tarde, Barnes foi até lá (...) *descobri que não é exactamente uma montanha, mas sim uma vasta cratera e que a aparência de montanha é devida à enorme pilha de rochas e detritos que, aparentemente, para o observador casual, parece ter sido vomitada para fora a partir das profundidades*. Depois de Krapf o ter informado que as pedras negras eram de ferro quase puro, *decidimos enviar algumas das amostras para se fazer um ensaio e ver o que valeriam; e também resolvemos constituir uma empresa, o que fizemos. A empresa chamava-se "Cañon Diablo Company"* (...). Quando o superintendente da ferrovia de Santa Fé passou pela vizinha cidade de Winslow, comunicaram-lhe a descoberta, dizendo-lhe que estavam à procura de investidores. Tendo-lhe enviado uma amostra, passados dias receberam um telegrama dizendo-lhes para um deles ir fazer o negócio. Assim, Frederick Krapf foi até à cidade de Albuquerque para se encontrar com o representante da companhia ferroviária, que lhe adiantou cerca de 1 500 dólares para se iniciarem os trabalhos de mineração. *Naquela época, Albuquerque oferecia os mais fascinantes incentivos a um indivíduo jovem e disposto a partilhar seu "dinero", e em três dias Krapf ficou sem dinheiro*. (...) *nunca mais o vimos nem ouvimos falar dele*.

Esta história contrasta um pouco com a que é narrada por outros autores. Por exemplo, Gilbert, em 1896, refere que a primeira descoberta foi efectuada, em 1886, quando *um grupo de pastores que estava nas encostas da cratera pastoreava suas ovelhas na planície circundante. Mathias Armijo, um deles, encontrou um pedaço de ferro, e equivocado pela aparência da sua superfície brilhante, supôs que fosse prata. O erro foi rapidamente corrigido por seus companheiros*. *Quatro anos mais tarde, um homem com o nome Craft, viu no ferro uma possibilidade de lucro* (...). Como é normal, a história de cada descoberta tem diferentes versões, com pontos de convergência e outros de divergência. Recorrendo ao título da famosa peça do dramaturgo italiano Luigi Pirandello (1867-1936), pode dizer-se que "para cada um sua verdade".

A descrição de Barnes difere, também, do que é referido nas primeiras duas notícias científicas sobre a cratera e o meteorito que a gerou, ou seja, a curta comunicação do mineralogista norte-americano Albert E. Foote (1846-1896), de 1891, onde são referidas *as características geológicas notáveis da localidade onde foi encontrado ferro meteorítico contendo diamantes*, e a outra comunicação desse ano (mas publicada em 1992) em que o assunto é aprofundado. Segundo Foote, *Na última parte de Março de 1891, a empresa mineira de NB Booth & Co.* (...) *recebeu uma carta de um prospector do Arizona, informando-os que tinha encontrado uma veia de ferro metálico perto de Canon Diablo, enviando, ao mesmo tempo, uma amostra que pedia para ser analisada*. (...) *Este resultado não era naturalmente satisfatório para a empresa de mineração e uma massa pesando*

quarenta libras foi partida em vários fragmentos (...). *Um deles foi enviado para o Presidente da Ferrovia de Santa Fé e outro para o general Williamson, comissário da Ferrovia do Atlântico e Pacífico* (...). *O general Williamson consultou-me sobre o valor provável da chamada mina de "ferro metálico puro".* (...) *a aparência da superfície e a notável estrutura cristalina da parte fracturada convenceram-me de que o fragmento fazia parte de uma massa meteorítica* (...). *Logo que possível, em Junho, fiz uma visita ao local e constatei que a quantidade, como de costume, tinha sido muito exagerada*. (...) *as cavidades expostas continham diamantes que (...) eram pequenos, pretos e, é claro, de pouco valor comercial*.

As comunicações de Foote não convenceram a comunidade científica. Em 1896, o geólogo Grove Karl Gilbert (1843-1918), que na altura era muito considerado nos Estados Unidos, fez uma comunicação em que analisava e testava duas hipóteses: a cratera tinha sido produzida pelo impacto de um meteorito *versus* tinha resultado de uma explosão de vapor relacionado com actividade vulcânica. A conclusão a que chegou foi a de que era de origem vulcânica, o que teve enorme influência na comunidade científica.

Passados poucos anos entra em cena Daniel Moreau Barringer (1860-1929), um geólogo que tinha enriquecido com a exploração de minas de prata. Ele próprio, num artigo publicado em 1905, conta como tomou conhecimento do assunto: *Em Outubro de 1902, numa conversa casual com S. J. Holsinger* [Samuel Joseph Holsinger (1859-1911)] *ouvi falar pela primeira vez de Coon Mountain ou Coon Butte e da sua cratera.* (...). *Eu estava, naturalmente, muito descrente do que Sr. Holsinger me contou: segundo algumas das pessoas que vivem na zona de Cañon Diablo, este grande buraco na superfície da Terra tinha sido produzido pelo impacto de um corpo de ferro que caiu do espaço* [até essa altura nenhuma estrutura de impacto tinha sido ainda documentada]. (...). *No entanto, o assunto continuou a interessar-me tanto que, no meu regresso a Filadélfia, decidi falar com meu amigo, o Sr. B. C. Tilghman* [o matemático e físico Benjamin Chew Tilghman V (1861-1911)] *devido aos seus conhecimentos científicos em geral. Isso foi no final de Janeiro de 1903. Decidimos escrever ao Sr. Holsinger para obter mais informações; após as recebermos tomámos as medidas necessárias para localizar a montanha* (...). *Desde então, recolhemos uma espantosa variedade de evidências que pareciam suportar a teoria da causa deste grande buraco* [cratera]*, e que refutavam a teoria adoptada pelo Sr. Gilbert, do United States Geological Survey, segundo a qual teria sido produzido por uma explosão de vapor*. Assim, com objectivos tanto científicos, como financeiros, Barringer adquiriu a propriedade e constituiu, em 1903, a "Standard Iron Company", a fim de proceder a operações de mineração na cratera para explorar o ferro que se assumia existir abaixo da superfície. Juntamente com Tilghman e Holsinger, que ele tinha recrutado para a "causa" como gerente das operações, começou de imediato investigações geológicas, incluindo sondagens por perfuração dentro e em torno da cratera, o que lhe permitiu concluir que esta tinha sido realmente provocada por um impacto violento. No sentido de melhor contextualizar o assunto é conveniente recordar que, como acima se faz alusão, não havia até à altura nenhuma cratera meteorítica reconhecida a nível mundial.

Sobre esta fase do processo e os nomes associados à cratera (e ao meteorito) recorremos a um trecho do texto de John Paul Barringer (1903–1996), filho de Daniel M. Barringer, publicado em 1993. *Meteor Crater não é o nome de um "meteoro" ou de um "meteorito". Deriva do nome de um posto de correios*. *Naqueles tempos, o Arizona era um território administrado pelo Departamento do Interior. A maior parte da terra era propriedade do governo. Se alguém fizesse um pedido para estabelecer uma herdade, para desenvolver uma mina ou para iniciar a criação de gado, conseguia adquirir as terras com muito pouca despesa. Meu pai percebeu que, enquanto aguardava a obtenção da "licença de mineração"* (isto é, o título),

teria que contratar alguém para ter certeza de que ninguém punha obstáculos ao pedido. Ocorreu-lhe, aparentemente, que se conseguisse que o seu zelador fosse também nomeado como agente postal de uma estação dos correios na ferrovia de Santa Fé, a cerca de oito milhas a norte, poderia economizar algum dinheiro. Washington concordou com a pretensão e solicitou-lhe a designação de um nome. Espontaneamente, respondeu "Chame-lhe Meteor". A Divisão de Nomes do Departamento do Interior tinha (e ainda tem) uma política segundo a qual qualquer acidente natural singular ou a sua localização deveria ser nomeada de acordo com a estação dos correios mais próxima, que, neste caso, era "Meteor", e, portanto, o que tinha sido anteriormente conhecido como Franklin Hole, Crater Mountain ou Coon Butte, adquiriu, por volta de 1905, o nome oficial de "Meteor Crater". Posteriormente, meu irmão Moreau [Daniel Moreau (Reau) Barringer (1800-1962)] *persuadiu a Meteoritical Society* [Sociedade Meteorítica] *a aprovar o nome cientificamente mais correcto de "Cratera meteorítica Barringer". Mas "Meteor Crater" era mais simples, e foi com este que passou a ser conhecido*.

Com base nos diferentes trabalhos efectuados (nomeadamente cartografia geológica, sondagens por perfuração, exames macroscópicos e microscópicos e análises químicas), Daniel M. Barringer e Benjamin Tilghman apresentaram à *Academy of Natural Science of Philadelphia*, em Setembro de 1905, duas comunicações, uma delas redigida do ponto de vista do geólogo (Barringer), e outra tendo como base a visão do físico, químico, e matemático (Tilghman). Os dois artigos, em oposição directa ao que tinha sido antes defendido por Grove K. Gilbert, em 1896, defendiam justificada e claramente a hipótese de se tratar de uma cratera meteorítica. As conclusões são totalmente convergentes: Barringer declara que *depois de um estudo muito cuidadoso, não resta na minha mente uma centelha de dúvida de que esta montanha e sua cratera foram produzidas pelo impacto de um grande meteorito ou pequeno asteróide, e que este caiu quase verticalmente, provavelmente com uma ligeira inclinação para Norte*; Tilghman, com uma abordagem mais científica e, portanto, mais cautelosa, afirma que *Tendo em conta estes factos* [apresentados no artigo] *positivamente estabelecidos, o autor sente que é justificado, sob a devida reserva quanto a factos que possam surgir posteriormente, anunciar que a formação nesta localidade* [a cratera] *se ficou a dever ao impacto de um enorme meteoro com dimensões sem precedentes*. A comunidade científica ficou dividida. Iniciara-se o que William Graves Hoyt designou, em 1987, no livro que escreveu sobre o assunto, por "Controvérsias de Coon Mountain", debate esse que se prolongou por várias décadas e dezenas de artigos.

A controvérsia viria a ser definitivamente resolvida apenas no final da década de 50, pelo trabalho desenvolvido pelo já citado geólogo norte-americano Eugene Merle Shoemaker[1], que na altura estava a preparar o seu doutoramento (que terminou em 1960) na *Princeton University*, em New Jersey, precisamente sobre a dinâmica do impacto que criou a cratera de Barringer. Todavia, ao contrário dos anteriores investigadores que se tinham dedicado ao assunto (como Gilbert e Barringer), Shoemaker tinha agora a possibilidade de comparar esta

[1] Eugene Merle Shoemaker (1928-1997) foi um dos fundadores, em 1961, do Programa de Investigação em Astrogeologia, do *U.S, Geological Survey*, em Flagstaff, no Arizona. Uma das suas descobertas mais mediáticas foi a do cometa Shoemaker–Levy 9, que se fragmentou em 1992 e colidiu com Júpiter em Julho de 1994, fornecendo a primeira observação directa de uma colisão extraterrestre entre objectos do Sistema Solar. Passou grande parte de seus últimos anos procurando (e encontrando), em todo o mundo, várias crateras de impacto que até aí não tinham sido ainda identificadas. Faleceu num acidente rodoviário, na Austrália, em 1997. Em 31 de Julho de 1999, as suas cinzas foram transportadas para a Lua, numa cápsula, pela sonda espacial Lunar Prospector, passando a ser a única pessoa cujas cinzas foram enterradas num corpo celeste exterior à Terra.

cratera com as que tinham sido formadas pelos testes subterrâneos de armas nucleares realizados em Yucca Flat, no Nevada, durante a Guerra Fria, designadamente com a provocada pela explosão do "*Teapot ESS*", com 1,2 kt (quilotoneladas), detonada em 23 de Março de 1955. Num relatório que produziu em 1959 as conclusões eram claras. Pelo seu interesse, dele traduzimos algumas frases: *As características de Meteor Crater correspondem inteiramente aos de uma cratera produzida por uma explosão nuclear provocada por um dispositivo cuja profundidade era cerca de 1/5 do diâmetro da cratera resultante.* (...) *A estrutura da Meteor Crater é semelhante à que teria sido produzida por um choque muito forte, ocorrido ao nível do actual fundo da cratera, de 400 pés* [mais de 120 m] *abaixo da superfície original.* (...) *O facto da rocha ter sido fundida, particularmente alguns arenitos quartzíticos relativamente puros, sugere por si só que o choque esteve envolvido na origem da Meteor Crater, pois que o ponto de fusão do quartzo está consideravelmente acima das temperaturas magmáticas comuns*. Além disso, nesse relatório, Shoemaker constata semelhanças marcantes entre os depósitos associados às crateras produzidas pelas detonações nucleares e a *Meteor Crater*, incluindo a estratigrafia invertido dos detritos ejectados (os provenientes das camadas mais recentes e, portanto, mais superficiais, ficam depositados, na acumulação detrítica resultante, em posição inferior), e a distribuição dos leques de elementos ejectados em torno de periferia das crateras. Tenta mesmo aprofundar o mecanismo do impacto, por exemplo, quando explica que *A velocidades supersónicas a hipersónicas, o impacto de um meteorito provoca penetração no solo através de um mecanismo complexo que inclui compressão das rochas e do meteorito devido ao choque bem como do fluxo hidrodinâmico do material comprimido sob alta pressão e temperatura. A profundidade de penetração do meteorito, antes que este perca a sua integridade como um corpo único, é função, principalmente, da velocidade e forma do meteorito, assim como das densidades e das equações de estado do meteorito e das rochas impactadas. O material intensamente comprimido dispersa-se, então, devido à onda de choque em expansão, produzindo grande volume de brecha*[1] (...). *No fundo e nas paredes inferiores da cratera existem níveis espessos de brecha contendo fragmentos mistos de aluvião e vidro disperso. Alguns dos fragmentos estão fortemente cizalhados e comprimidos. O vidro é constituído por aluvião que foi total ou parcialmente fundido pelo choque*. Finalmente, após mais de meio século de debates, as "Controvérsias de Coon Mountain" começavam a dissipar-se.

A evidência decisiva surgiu no ano seguinte, em 1960, quando Shoemaker enviou amostras de arenito impactado para o mineralogista Edward Ching-Te Chao (1919-2008), do *U.S, Geological Survey*, e este verificou que continham o mineral coesite, um quartzo de choque, que, portanto, apenas é gerado em ambientes de muito altas pressões. Embora a coesite já tivesse sido sintetizado em laboratório, em 1953, pelo químico Loring Coes Jr. (1915-1978), nunca tinha sido encontrado na natureza. Viria a ser detectado nas crateras produzidas por explosões nucleares subterrâneas e, em 1960, como se referiu, na *Meteor Crater*. As dúvidas estavam, finalmente dissipadas.

Assim, a Cratera de Barringer, resultante do impacto do meteorito de Canyon Diablo, foi a primeira cratera meteorítica cientificamente reconhecida na Terra, pelo que desenvolvemos um pouco mais este assunto. Posteriormente, várias outras crateras do mesmo tipo foram

---

[1] Brecha é uma rocha clástica formada por fragmentos angulosos aglomerados numa matriz de material mais fino, que pode ter composição semelhante ou diferente. O nome foi introduzido no final do século XVIII a partir do italiano "breccia" = "quebrar", "partir", devido aos elementos angulosos que denunciam fractura recente.

identificadas, sendo a presença de coesite um elemento decisivo para essa identificação. Conhecem-se actualmente já cerca de 200 crateras de impacto.

Tendo a Ciência reconhecido apenas há cerca de meio século a realidade dos impactos meteoríticos que provocam crateras na superfície terrestre, e sendo as preocupações com as modificações climáticas também recentes, é compreensível que o conhecimento sobre estes assuntos e suas correlações seja ainda limitado. Não se sabe ainda bem quais são as consequências que o percurso destes corpos celestes na atmosfera têm na composição desta, tal como só agora se começam a perceber os efeitos geológicos e climáticos que estas colisões com a superfície terrestre podem produzir. Aliás, o assunto começou apenas a ser devidamente considerado e debatido só após a publicação, em 1980, da hipótese de Alvarez e colegas, segundo a qual teria sido o impacto de um grande asteróide que teria provocado a extinção em massa do Cretácico – Paleogénico, há cerca de 66 milhões de anos. No que se refere ao meteorito que formou a Cratera de Barringer, pode dizer-se que se desconhecem em absoluto eventuais consequências induzidas no clima em geral, as quais, se as houve, devem ter sido muito limitadas, até porque se tratou de um objecto relativamente pequeno e do tipo metálico. Estima-se que, em média, se verifique o impacto de um objecto destas dimensões a cada 6 000 anos (embora cálculos baseados em dados recentes sugiram que essa média temporal possa ser significativamente menor).

Todavia, as consequências a nível regional são mais fáceis de deduzir. Os estudos paleontológicos permitem deduzir que, na altura do impacto, a região estava coberta por bosques dominados por zimbros e pinheiros, onde vivia grande variedade de animais, nomeadamente grandes mamíferos, entre os quais mamutes e preguiças gigantes. Os danos causados pelo impacto teriam sido semelhante ao da explosão de uma bomba nuclear, embora sem os efeitos da radiação. O material ejectado pelo impacto abrangeu uma área provavelmente com raio superior a 2 km, e a onda de choque teria provocado ventos com mais de 1 000 km/h até uns 5 km do local onde se formou a cratera, o que significa que a vegetação teria sido completamente destruída até quase 20 km de distância. Com tal onda de choque, os animais que estavam até algumas dezenas de quilómetros do local do impacto sofreram enormes diferenças entre as pressões externa e interna, provocando-lhe graves hemorragias e morte. Mais próximo, até à dezena ou dezena e meia de quilómetros do centro da áreas afectada, sentiu-se a emissão térmica da explosão, que teria incinerado os animais que aí estavam e provocado grandes incêndios florestais. Porém, estes efeitos teriam ficado confinados à região adjacente ao local do impacto. Não se sabe se o evento lançou grandes quantidades de poeiras para a atmosfera, que pudessem entrar na circulação geral, assim induzindo consequências mais generalizadas ou, mesmo, globais, as quais, caso tivessem acontecido, teriam sido de curta duração.

II.7.3.4. Impactos extra terrestres e as extinções do Eocénico – Oligocénico

Contextualização

Como se referiu, só se começou a ter consciência da importância que a colisão de pequenos corpos extra-terrestres com a Terra podem ter na evolução química e térmica desta e, portanto, também no clima e, por consequência, na habitabilidade do planeta, após a comprovação, em 1960, de que a *Meteor Crater* é, na verdade, uma cratera de impacto. Após a publicação, em 1980, do trabalho de Alvarez e colegas, em que se atribuía a extinção em massa do Cretácico – Paleogénico a um grande impacto meteorítico, o tema rapidamente começou a adquirir importância cada vez maior na comunidade científica. O assunto atingiu ainda maior relevância com os resultados que foram sendo obtidos através do estudo das crateras lunares e de outros planetas do sistema solar, ressaltando, neste aspecto, os dados

adquiridos pelas sondas espaciais. Ao mesmo tempo, a aplicação de novas tecnologias (satelitárias, geofísicas, geocronológicas, isotópicas, informáticas, etc.) ao estudo das estruturas terrestres tem vindo a permitir a definição, de forma mais pormenorizada e rigorosa, das consequências da chegada de material extraterrestre ao nosso planeta, tendo nas últimas décadas sido identificadas dezenas de cratera de impacto. Assim, os conhecimentos sobre tão importante tema são bastante recentes, tendo sido desenvolvidos essencialmente, como se referiu, nas últimas décadas, sendo de prever que, no futuro próximo, surgirão muitas outras descobertas surpreendentes. Porém, devemos ter presente que o estudo do passado geológico é baseado, por natureza, em hipóteses e teorias, pois que, na maior parte dos casos, não é possível proceder à imprescindível replicação necessária para comprovar as deduções teóricas. Uma das teorias mais recentes relaciona-se com os impactos meteoríticos que teriam estado na base da extinção em larga escala (embora menor em comparação com as maiores extinções em massa), que incidiu maioritariamente nos organismos aquáticos (marinhos ou não), que se verificou na transição entre o Eocénico[1] e o Oligocénico[2],

Para se ter uma melhor percepção do que então aconteceu, é conveniente descrever muito sucintamente como era o mundo nessa altura. Desde o início do Eocénico e durante a maior parte desta época, a temperatura média da Terra era relativamente elevada (a maior de todo o Cenozóico), o que favoreceu o desenvolvimento de bosques tropicais por todo o globo, incluindo as regiões polares. Não existindo calotes polares, o nível das águas do mar era, então, muito mais elevado do que hoje conhecemos. Porém, há uns 36 milhões de anos, começaram a verificar-se mudanças climáticas bruscas. O clima começou a arrefecer e a tornar-se mais seco, consolidando-se essa tendência no início do Oligocénico. Como consequência, a extensão dos bosques tropicais reduziu-se substancialmente, sendo substituídos, em diversas regiões do mundo, por planícies mais abertas no que se refere ao coberto vegetal. Com este arrefecimento, começou a desenvolver-se a calote polar antárctica. Devido à diminuição de temperatura e acumulação de gelo na zona polar austral, o nível do mar começou a baixar de forma bastante significativa. Não surpreende que, com estas mudanças climáticas rápidas, muitas espécies, com mais incidência nas marinhas, se tivessem extinguido, dando origem a um novo conjunto faunístico com características diferentes. Foi o que o paleontólogo suíço Hans Georg Stehlin (1870-1941) designou, em 1910, por *La Grande Coupure* (A Grande Ruptura), expressão que entrou na terminologia científica, sendo ainda hoje utilizada com frequência. Segundo as estimativas efectuadas em 2009 por uma equipa internacional de cientistas liderada por Zhonghui Liu, as temperaturas superficiais marinhas a latitudes elevadas, entre 45º e 70º, que eram de cerca de 20ºC antes da transição climática, arrefeceram, em média, cerca de 5ºC.

Devido a esta transição para um clima mais frio e com características ambientais diferentes, muitas espécies não se conseguiram adaptar e acabaram por se extinguir. Todavia, outras, com maior poder de adaptação, conseguiram sobreviver, modificando-se, ou seja, evoluindo e

---

[1] O Eocénico (que decorreu entre há 56,0 e 33,9 milhões de anos) é a 2ª época do período Paleogénico, com que se iniciou a Era Cenozóica. O nome deriva do grego antigo ἠώς [ēṓs] = “alvorada”, “manhã”, aqui com a acepção de início + καινός [kainós] = “novo”, “renovado”, em alusão à nova (moderna) fauna que surgiu nesta época. O termo foi introduzido na terminologia geológica em 1833, pelo advogado e geólogo britânico Charles Lyell (1797-1875), no 3º volume da sua famosa obra “Principles of Geology”.

[2] O Oligocénico (que decorreu entre há 33,9 e 23,03 milhões de anos, foi a 3ª e última época da Era Cenozóica, tendo sucedido ao Eocénico. O nome deriva do grego antigo ὀλίγος [olígos] = “poucos”, “escassos” + καινός [kainós] = “novo”, “renovado”, em alusão às poucas espécies, principalmente de mamíferos, que surgiram nesta época comparativamente às que apareceram no Eocénico. O termo foi proposto em 1854 pelo paleontólogo alemão Heinrich Ernst Beyrich (1815-1896).

dando origem a novas espécies. Foi assim que começaram a prosperar os precursores de muitos mamíferos actuais, tais como cavalos, veados, camelos, elefantes, gatos, cães e muitos outros. Alguns destes mamíferos, vivendo em espaços abertos, adquiriram proporções gigantescas, como aconteceu com alguns géneros da família *Hyracodontidae* (precursores dos rinocerontes, mas sem chifre no nariz), como os *indricotérios* e os *paracerateros,* herbívoros que chegavam a pesar mais de 17 toneladas e a medir mais de 5,5 metros de altura (refira-se, para comparação, que os maiores elefantes actuais pesam menos de 7 toneladas e, no máximo, 4 metros de altura), sendo considerados os maiores mamíferos que já andaram sobre a face da terra. Foi também nesta altura que os primatas começaram a evoluir, de tal forma que, mais tarde, viriam a dar origem ao Homem.

Este período de transição do Eocénico para o Oligocénico foi verdadeiramente um período de renovação faunística. Mais do que isso, com o clima mais frio e o início da constituição da calote antárctica, o nível médio do mar desceu substancialmente, criando pontes terrestres que viabilizaram larga expansão territorial das novas espécies.

Ao longo do tempo, têm sido avançadas várias hipóteses para estas mudanças climáticas e as extinções que então ocorreram. Uma das especulações admite que, na altura, se verificou actividade vulcânica intensa, cujas emissões para a alta atmosfera teriam induzido um longo inverno vulcânico. Outra teoria, que teve grande aceitação, defende que o arrefecimento climático foi provocado pela diminuição do dióxido de carbono atmosférico e consequente atenuação do efeito de estufa; com efeito, os teores de CO_2 na atmosfera começaram a decrescer lentamente em meados do Eocénico, até ao final desta época, atingindo possivelmente valores mínimos há aproximadamente 34 milhões de anos, ou seja, logo no início do Oligocénico. Uma outra teoria recorre à paleogeografia da altura e à deriva continental: no início do Eocénico, a Austrália e Antárctica não se tinham separado ainda e, nestas condições, as águas das correntes equatoriais quentes misturavam-se com as águas antárcticas mais frias, o que tinha como consequência distribuição de calor por todo o planeta, o que permitia que as temperaturas globais se mantivessem altas; porém, há cerca de 45 milhões de anos, a Austrália começou a separar-se do continente, fazendo com que as águas quentes fossem deflectidas e deixassem de chegar à Antárctica; criou-se, assim, um canal relativamente isolado com águas frias entre os dois novos continentes resultantes (Austrália e Antárctica); nestas novas condições, verificou-se arrefecimento da região antárctica, e o oceano circundante começou a congelar, dele saindo, para Norte, água fria e icebergs, o que reforçou a diminuição da temperatura global. Como é frequente, as grandes mudanças climáticas não têm apenas uma causa única. Vários acontecimentos, por vezes correlacionados, contribuem para tais modificações, sendo difícil identificar qual foi a causa original ou a principal.

Como já acima se referiu, nas últimas duas décadas tem-se feito um esforço para aprofundar o conhecimento sobre possíveis consequências climáticas da colisão de corpos extraterrestres com o nosso planeta. Foi assim que, há alguns anos, surgiu a hipótese das grandes modificações climáticas que ocorreram na transição entre o Eocénico e o Oligocénico terem sido induzidas, parcial ou totalmente, por impactos de objectos provenientes do espaço. Com efeito, existem algumas crateras meteoríticas, algumas de grandes dimensões, que foram geradas mais ou menos nesta altura, entre as quais a de Popigai, na Sibéria, e a da Baía de Chesapeake, no nordeste dos Estados Unidos da América.

A cratera de Popigai

Em Popigai, junto à Península de Tamyr (a parte continental mais a Norte da Eurásia), no norte da Sibéria, o impacto de um grande bólide ocorrido há aproximadamente 35 milhões de

anos, gerou uma cratera com cerca de 100 km de diâmetro. A estrutura é conhecida desde finais dos anos 40 do século XX, quando se iniciou o estudo geológico da plataforma continental norte siberiana. Durante décadas, esta estranha forma foi atribuída a erosão, a subsidência tectónica, ou à combinação destes processos com actividade vulcânica. Em 1971/72, o geólogo russo Victor L. Masaitis aventou pela primeira vez a hipótese de tal estrutura corresponder a uma cratera de impacto. Porém, só nas décadas de 70 e 80 é que foram efectuados trabalhos mais completos, incluindo prospecção geofísica e sondagens por perfuração. Os resultados foram impressionantes: tratava-se realmente de uma enorme cratera de impacto, bastante bem preservada, tal como o está a distribuição e composição das formações rochosas relacionadas com essa colisão.

Estima-se que a cratera, que, como se disse, tem cerca de 100 km de diâmetro, foi provocada pelo impacto de um objecto com aproximadamente 5 a 8 km de diâmetro, deslocando-se à hipervelocidade da ordem de 15 a 20 km/s. Segundo alguns autores, a energia libertada teria sido equivalente à de centenas ou milhares de bombas nucleares, tendo sido atingidas instantaneamente temperaturas superiores à da superfície do Sol. A colisão provocou uma borda de rochas deformadas com mais de 20 km de largura. O impacto provocou a fusão de cerca de 1 750 km^3 de rochas, tendo metade deste volume sido ejectado para a região circundante (como tectites e outros impactitos[1]), tendo os fragmentos com a dimensão de poeira atingido a alta atmosfera. Formaram-se, durante o impacto, extensos depósitos de suevite[2], com até 600 m de espessura no local da colisão.

Outro aspecto interessante relacionado com a cratera é a profusão de diamantes de impacto. Como já acima se referiu, diamantes deste tipo foram pela primeira vez assinalados na Montanha de Coon (Cratera de Barringer ou *Meteor Crater*) por Foote, em 1892, e mais bem documentados por Barringer, em 1905. Em Popigai, a sua presença foi assinalada desde início da década de 70 (em trabalhos em russo), mas cuja ampla divulgação internacional aconteceu apenas em 1998, com um artigo de Victor L. Masaitis redigido em inglês. Estes diamantes, resultantes da transformação da grafite pela grande temperatura e pressão geradas durante a colisão, herdaram em muitos casos propriedades e características do mineral precursor. Por vezes chegam a atingir 10 mm, mas a grande maioria são pequenos, com dimensões médias entre 0,5 e 2 mm, raramente transparentes, por vezes amarelos e, na maioria, cinzentos e negros, nunca atingindo qualidade de gemas.

O impacto ocorreu numa região caracterizada por gnaisses pré-câmbricos com grafite e granadas, sobre os quais se acumularam rochas sedimentares com espessura da ordem de 1,5 km. Segundo as deduções efectuadas em 2004 pelo geólogo norte-americano Keenan Lee, quando ocorreu o impacto formou-se instantaneamente uma cavidade com uns 8 a 10 km de profundidade, sendo as rochas (sedimentares e gnaisses) fundidas e vaporizadas; cerca de

---

[1] Impactitos são rochas directamente afectadas por impactos de grande energia, incluindo metamorfismo de choque, fusão de materiais e misturas de elementos gerados por ambos os processos.

[2] A suevite é um impactito gerado na cratera de impacto e em torno dela, através da mistura de fragmentos fundidos e de clastos não fundidos da rocha que existia no local de impacto, formando uma brecha. Pode apresentar composições e cores muito varáveis, dependendo das rochas que foram impactadas. O termo foi proposto em 1919 pelo geólogo alemão Eberhard Fraas (1862-1915) a propósito da cratera de Nördlinger Ries, no sul da Alemanha, que na altura se pensava ser de origem vulcânica. Traduzindo as palavras do autor, *constituem um caso único de fusão regional, em particular na forma como as rochas afectadas e o fluxo de material fundido se interpenetram* (...). *Portanto, esta rocha mista do vulcanismo de Ries representa um tipo que, considerando a sua área de ocorrência na Suábia, gostaria de designar de "suevite"*. Bastante mais tarde reconheceu-se que a suevite não está relacionada com processos vulcânicos, mas sim com impactos meteoríticos.

99% do objecto impactante foi também vaporizado (sendo ejectado como pluma de vapor) e o restante foi incorporado nas rochas fundidas. No local do impacto e imediações (talvez até uma dezena de quilómetros), o calor e a pressão excederam as condições de formação de diamantes, mas atenuaram-se com a distância ao ponto de colisão. Assim, entre 12 e 13,6 km de distância, houve condições para conversão instantânea da grafite em diamantes (sem serem subsequentemente destruídos), ou seja, numa zona hemisférica com cerca de 1,6 km de espessura, equivalente a uns 1 600 km^3. Porém, alguns dos blocos ejectados caíram a mais de 70 km da cratera, e alguns diamantes foram transportados até mais de 150 km para Este.

Como já se aludiu, a colisão de um tão grande corpo extraterrestre (as estimativas apontam sempre para mais de 5 km de diâmetro, e algumas para cerca de 8 a 10 km) em Popigai provocou seguramente grandes alterações na atmosfera, não só porque, ao atravessá-la a hipervelocidade, parte substancial da matéria rochosa que o constituía foi vaporizada e convertida em poeiras finas e aerossóis que ficaram em suspensão, mas também porque, com um impacto de tão grande energia, muito material dessas ínfimas dimensões foi ejectado até grande altitude. Devido à circulação atmosférica geral (ver ponto I.2.2.3), estes materiais em suspensão acabaram por se distribuir por todo o globo, bloqueando parte da energia solar que chega à superfície e, por consequência, induzindo um Inverno Meteorítico. Também como já se referiu, tal teria provocado (ou, pelo menos, contribuído de forma muito significativa) para a extinção em massa que ocorreu na transição entre o Eocénico e o Oligocénico, há cerca de 36 milhões de anos.

Porém, sabe-se hoje que, nesta altura, não foi apenas o condrito que caiu em Popigai que atingiu a Terra. Outros corpos extraterrestres, embora, tanto quanto se sabe, menores, colidiram mais ou menos na mesma altura com o nosso planeta. Além da cratera de Popigai, constituída há aproximadamente 35,7 milhões de anos, foram já identificadas pelo menos outras três, que parecem ter idades compatíveis

A cratera de Chesapeake Bay e outras

O primeiro indício consistente de que algo invulgar existia no Eocénico superior na região da baía de Chesapeake, no Leste dos Estados Unidos da América, foi obtido em 1983, durante a perfuração do sítio 612, do DSDP - *Deep Sea Drilling Project* (ver nota 1 da p. II.95), ao largo da costa de Atlantic City. Na coluna sedimentar então recolhida, nas camadas do final do Eocénico, existia um nível com quase 20 cm com microtectites, quartzo de choque, coesite e outros indicadores de material ejectado por um impacto que teria ocorrido não muito longe deste local. Nos anos seguintes foram-se acumulando vários outros indícios, até que, em 1994, a integração de todas estas informações, incluindo perfis de reflexão sísmica efectuados por companhias de petróleo, sondagens por perfuração e novos dados sísmicos obtidos propositadamente, permitiram a C. Wylie Poag e colegas do *U.S. Geological Survey*, definir no Eocénico superior desta zona de Chesapeake Bay uma cratera de impacto, coberta por 300 a 500 m de sedimentos mais recentes, com cerca de 85 km de largura e mais de 1,5 km de profundidade. Em quatro sondagens por perfuração foi identificada uma brecha de impacto que rodeia e preenche parcialmente a cratera. O grande campo de tectites existente na América do Norte parece ter tido origem neste grande impacto.

O bólide que causou tão grande cratera teria entre 3 a 5 km de diâmetro, e caiu no mar, na plataforma continental que então existia (recordemos que, na altura, o nível do mar estava numa posição bastante superior à actual). Através de datações radiométricas sabe-se que o evento ocorreu há aproximadamente 35,3 milhões de anos, ou seja, mais ou menos na mesma altura em que se verificou o impacto de Popigai.

Mais ou menos da mesma altura são as crateras de Mistastin, na província do Labrador, Canadá, com diâmetro estimado em menos de 30 km, formada há cerca de 36,4 milhões de anos, e a de Toms Canyon, a cerca de 160 km de Atlantic City, New Jersey, ainda não completamente reconhecida, com diâmetro talvez de pouco mais de 20 km, que teria resultado de uma colisão há, aproximadamente, 35 milhões de anos. Eventualmente, poderia talvez considerar-se neste conjunto, porventura como elemento precursor, também a cratera de Wanapitei, na província do Ontário, no Canada, com cerca de 8 km de diâmetro e data estimada em cerca de 37 milhões de anos. Se tivermos em consideração que a maior parte da Terra é ocupada pelo oceano, onde, como se referiu, estes impactos são muito mais difíceis de detectar, e que, quer em terra, quer no mar, estão frequentemente cobertas por centenas de metros de sedimentos que se acumularam após esses eventos, pode deduzir-se que a quantidade de impactos ocorridos nessa altura pode ter sido bastante maior. Assim, começa agora a ter-se a percepção de que, no final do Eocénico, algo de invulgar aconteceu, tendo a Terra sido atingida em relativamente pouco tempo (cerca de um milhão de anos ou pouco mais) por vários grandes corpos extraterrestres.

Uma "chuva" de corpos extraterrestres no final do Eocénico?

Embora o nosso conhecimento sobre o impacto de corpos extraterrestres seja ainda muito parcelar e imperfeito, várias estimativas apontam para a queda de objectos com diâmetro da ordem de 1 km, em média, a cada 500 000 anos, ocorrendo a colisão de asteróides com cerca de 5 km, em média, a cada vinte milhões de anos. Porém, como vimos, no final do Eocénico estão duas crateras confirmadas que foram geradas por impactos de corpos com cerca de 5 km: a de Popigai, provocada por um corpo com 5 a 8 km de diâmetro, e a de Chesapeake Bay, produzida por um bólide com 3 a 5 km de diâmetro. Segundo as datações radiométricas, estes corpos parecem ter caído, respectivamente, há 35,7 e 35,3 milhões de anos, ou seja, com menos de 500 000 anos de intervalo. É possível que as outras crateras já confirmadas (como a de Mistastin e a de Wanapitei) ou suspeitas (como a de Toms Canyon) tenham sido geradas por objectos com diâmetro da ordem de 1 km. Devemos também ter em consideração que, muito provavelmente, como já se disse, há outras crateras da mesma altura que não foram ainda detectadas, ou porque caíram em oceano profundo, ou porque estão soterradas sob muitos metros de sedimentos, e não foram até agora diagnosticadas. Assim, a parte final do Eocénico parece ter sido um período que foge por completo às médias que têm sido estimadas para a colisão de grandes corpos extraterrestres.

Desde os anos 80 do século passado que há essa percepção, embora os resultados que têm vindo a ser obtidos nas últimas décadas reforcem bastante essa ideia, até porque, poucas mais são as crateras reconhecidas em todo o registo geológico. Claro que esta concentração de colisões eocénicas pode corresponder, apenas, a uma anomalia estatística, o que é frequente acontecer quando se trabalha com médias. Todavia, a generalidade da comunidade científica é de opinião que não é o caso, e que algo de inusitado aconteceu nessa altura.

As hipóteses explicativas têm-se sucedido. Entre as várias teorias ressaltamos a que defende que tal concentração de impactos poderia ser o resultado de colisões verificadas na cintura de asteróides, tendo alguns dos fragmentos resultantes adquirido órbitas de colisão com a Terra. Alguns autores formulam a hipótese de colisões em cadeia, em que o choque de dois grandes asteróides teria produzido grandes fragmentos, alguns dos quais, por sua vez, teriam colidido com outros asteróides, produzindo ainda mais fragmentos, que se dispersaram em todas as direcções, adquirindo inclusivamente órbitas de intercepção com a Terra. Outra teoria postula

que poderia ter havido qualquer tipo de perturbação gravitacional na nuvem de Oort[1], que teria provocado o impacto de uma "chuva" de cometas e outros objectos na Terra. Na realidade, continua a não se compreender bem o que aconteceu.

Porém, os avanços tecnológicos, entre os quais os que se relacionam com as análises isotópicas, têm permitido que se percebam melhor os contornos do que se verificou na transição do Eocénico para o Oligocénico, o que possibilita melhor contextualização dos impactos a que temos vindo a aludir. Em 1998, uma equipa liderada pelo geoquímico Kenneth A. Farley, divulgou os resultados a que chegou através da análise de uma secção nos Apeninos italianos, constituída por calcários pelágicos acumulados precisamente no final do Eocénico e início do Oligocénico, onde determinou as razões entre os isótopos estáveis de hélio[2].

Como se sabe, o ^{3}He nos sedimentos provém essencialmente de poeiras interplanetárias que chegam à Terra. Partículas com diâmetros superiores a algumas dezenas de micra, ao passarem pela atmosfera, sofrem aquecimento intenso e, por consequência, desgasificação e libertação do ^{3}He, grande parte do qual acaba, mais cedo ou mais tarde, por se escapar novamente para o espaço. Porém, as partículas menores desaceleram rapidamente nas camadas superiores da atmosfera, não sofrendo grande aquecimento e, portanto, sedimentam até à superfície mantendo o seu conteúdo em ^{3}He. Nestas condições, o ^{3}He presente nos sedimentos de registo estratigráfico é correlacionável com a quantidade de poeiras interplanetárias muito finas que chegam à Terra. Ao contrário de outros indicadores, como os metais do grupo da platina (irídio, ósmio, platina e outros), o quartzo de choque ou as crateras de impacto, que reflectem a chegada ao planeta de grandes corpos, o ^{3}He traduz "apenas" a introdução de poeiras cósmicas (que frequentemente acompanham essas grandes colisões).

Os resultados obtidos indicam que a quantidade de poeiras cósmicas finas que chegaram à Terra (indicadas pelo aumento de ^{3}He nos sedimentos) se ampliou durante cerca de 2,5 milhões de anos no final do Eocénico. Esse aumento iniciou-se em torno de um milhão de anos antes dos grandes impactos de Popigai e de Chesapeake Bay (e outros mais pequenos), atingindo um pico mais ou menos na altura dessas colisões, após o que começou a decrescer, de tal modo que, cerca de 1,7 milhões depois desses impactos, os níveis de ^{3}He voltaram a ser semelhantes aos que existiam antes. Trabalhos posteriores deram resultados convergentes

---

[1] A nuvem de Oort é a zona externa do sistema solar, localizada entre 50 mil a 200 mil unidades astronómicas (distância média entre a Terra e o Sol) do centro do sistema e, portanto, muito para lá do Cinturão de Kuiper (ver nota 1 da p.II.89). É constituída por imensa quantidade de planetesimais, triliões dos quais com diâmetro superior a 1 km. A vasta maioria é constituída por objectos gelados (água, metano, dióxido de carbono, etc.) apenas com resíduos do tipo rochoso ou metálico. Porém, uma pequena percentagem é constituído por corpos do tipo asteróide. Aceita-se que os cometas de longo período têm origem na nuvem de Oort. A parte externa desta nuvem está tão afastada do Sol que pouco é influenciada pela gravidade deste, o que significa que outras estrelas e a própria Via Láctea podem interferir na órbita destes corpos, por vezes dando-lhes novas características que os fazem passar pelo Sistema Solar interior. A designação provém do astrónomo holandês Jan Hendrik Oort (1900-1992) que, em 1950, concebeu a sua existência. Porém, o astrónomo estónio Ernst Julius Öpik (1893-1985) já tinha, em 1932, feito proposta parecida. Por essa razão, muitas vezes é adoptada a designação de nuvem de Öpik–Oort.

[2] O hélio (He) é um elemento químico com número atómico 2 (ou seja, o núcleo tem dois protões). Porém, como é vulgar, o número de neutrões pode variar, isto é, há vários isótopos, mais exactamente nove, mas apenas dois são estáveis (não se desintegram): o ^{3}He, com 1 neutrão, e o ^{4}He, com dois neutrões. Têm processos de formação diferentes: o ^{4}He é produzido na Terra por desintegração alfa de elementos radioactivos mais pesados; o ^{3}He tem origem diferente, e o que existe na Terra vem desde o período de formação do planeta ou aqui chegou através de poeiras cósmicas. O ^{3}He é muito raro na Terra, onde os seus teores são aproximadamente dez mil vezes mais pequenos que os do ^{4}He.

com estes. Portanto, pode deduzir-se que, na última parte do Eocénico, a Terra foi sujeita à introdução invulgar de material interplanetário, que teve o seu auge quando ocorreram as grande colisões, e depois progressivamente voltou à normalidade.

Se, com os novos dados que têm vindo a ser adquiridos, os contornos do que aconteceu se tornam mais nítidos, subsiste a indeterminação da causa: fragmentação de asteróides cujos resíduos foram lançados na direcção da Terra? Perturbação gravitacional que fez com que grande quantidade de cometas adquirisse órbitas que passaram a cruzar o sistema solar interno? Trabalhos futuros, incluindo a detecção e estudo de outras crateras de impacto produzidas nessa altura, bem como o exame pormenorizado de crateras existentes na Lua e noutros planetas, conjugados com análises isotópicas minuciosas, por certo que poderão esclarecer melhor o que aconteceu na parte final do Eocénico e que provocou tão grandes modificações climáticas e ecossistémicas.

II.7.3.5. O Dryas Recente e impactos extraterrestres

No final do último período glaciário, há cerca de 12 900 anos, quando as condições interglaciárias estavam já estabelecidas, verificou-se um episódio muito marcante de brusco arrefecimento, conhecido pela designação de Dryas Recente (Y*ounger Dryas* na terminologia anglo-saxónica). Como se referiu no ponto I.3.2., a causa desta mudança climática abrupta é normalmente atribuída à acumulação, na periferia da zona glaciada da América do Norte, de águas provenientes da fusão dos gelos, que, tendo a sua drenagem natural até ao mar ainda barrado por massas geladas, originaram a formação de enormes lagos de água doce, principalmente o que é designado por Lago Agassiz. Com a continuação do aquecimento atmosférico, os gelos continuaram a ser fundidos, até que, há cerca de 12 900 anos, a última massa de gelo que barrava a passagem da água para o mar desapareceu também, tendo todo esse grande volume hídrico sido introduzido muito rapidamente no norte do Atlântico Norte e, sendo essa água doce menos densa que a água salgada, manteve-se na camada oceânica superficial. Como a temperatura de congelamento da agua doce é superior à da água salgada, ao aproximar-se o Inverno parte significativa da superfície marinha ficou no estado sólido, atenuando fortemente, ou mesmo interrompendo, a produção de Água Atlântica de Fundo e, portanto, a circulação termohalina, voltando a instalar-se condições glaciárias.

Por natureza, tentamos sempre reduzir as relações causais a eventos únicos e isolados. Porém, a realidade tende a demonstrar que, embora muitas vezes haja uma causa mais importante, raramente é única. Em geral há outros eventos que ocorrem mais ou menos ao mesmo tempo, cuja interacção pode ser positiva (o que resulta em reforço ou intensificação das consequências) ou negativa (ou seja, as consequências tendem a amortecer-se ou, mesmo, a eliminar-se). Assim, é bem possível que o desenvolvimento abrupto do Dryas recente não tenha sido provocado por uma única causa.

Em 2007, uma equipa de 26 investigadores liderada por Richard B. Firestone fez a integração de várias evidências existentes nos sedimentos que cobrem a parte final da existência da Cultura Clóvis[1], nomeadamente relacionadas com picos de abundância de grãos magnéticos com irídio, de esférulas magnéticas, de carvão vegetal e fuligem, de partículas de vidro com

[1] A Cultura Clóvis é uma cultura pré-histórica da América do Norte, assim designada devido aos artefactos típicos que foram descobertos nas décadas de 20 e 30 do século passado nas proximidades da cidade de Clóvis, no Novo México. Artefactos característicos desta cultura foram posteriormente descobertos em muitas outras localidades, na América do Norte mas, também, na América do Sul. São considerados os ancestrais da maioria das culturas indígenas das Américas. Principalmente na América do Norte, floresceram entre há cerca de 13 200 e 12 900 anos.

carbono e nanodiamantes, e teores de ^{3}He mais elevados do que é costume, tendo concluído que todos estes indícios apontam para ocorrência da colisão de um corpo extraterrestre há uns 12 900 anos, que teria contribuído para o rápido arrefecimento que então se verificou e induziu o Dryas Recente.

Nos últimos anos têm surgido vários artigos que tendem a confirmar e complementar a hipótese de que a transição do último glaciário para o actual interglaciário foi marcada pelo forte impacto de um corpo extraterrestre. Refira-se que, quando se fala em impacto, tal não significa obrigatoriamente a colisão de um corpo cósmico com a superfície do planeta, produzindo uma enorme cratera (como a de Popigai). Designa-se, também, por impacto a penetração na atmosfera da Terra de um objecto astronómico de dimensões apreciáveis, que, muitas vezes (devido ao aquecimento e rápida desgazeificação), é sujeito a intensa desintegração ou, por outras palavras, explode de forma extremamente energética já na baixa atmosfera. Nestes casos, não se produz uma grande cratera, embora o evento, devido aos fragmentos maiores resultantes da explosão, possam provocar numerosos impactos menores, com formação de pequenas crateras. Segundo muitos autores, foi o que se verificou com a colisão deste corpo celeste há cerca de 12 900 anos.

Como se disse, neste nível correspondente ao início do Dryas Recente têm vindo a ser encontrados muitos indícios da colisão aludida. Apenas como exemplo, refere-se o trabalho de Michail I. Petaev e colegas, que, no testemunho de gelo da Groenlândia GISP2 (que no ponto I.5.4. utilizámos para acompanhar o desenvolvimento climático e social nos últimos milhares de anos), encontraram elevadas concentrações de platina[1] em amostras desta idade, o que, em princípio, está associado a impactos de corpos extraterrestres, principalmente do tipo metálico.

Analisando as amostras do GISP2 na parte correspondente à transição entre o Bølling-Allerød (período quente que ocorreu nas fases finais do glaciário) e o Dryas Recente (em que voltaram a instalar-se condições glaciárias), ou seja, entre há 13 064 e 12 279 anos (correspondente a profundidades no testemunho de gelo ente 1 708 e 1 720 m), os autores encontraram uma grande anomalia de platina centrada precisamente em torno de há 12 900 a 12 880 anos, precisamente quando se verifica uma queda acentuada dos valores de $\delta^{18}O$ (correlacionáveis com a temperatura). Nessa parte do testemunho, as concentrações de platina aumentam gradualmente durante cerca de 14 anos até atingirem valores mais de 100 vezes maiores do que se verificava antes, e depois decrescem durante os cerca de 7 anos subsequentes, até aos níveis que existiam antes do evento. O aludido aumento gradual mas bastante rápido da platina durante cerca de 14 anos parece sugerir injecções múltiplas de poeiras ricas neste metal na estratosfera. O decaimento nos 7 anos subsequentes é consistente com o tempo de vida das poeiras na estratosfera, estimada em cerca de 5 anos. Curiosamente, não foram detectadas grandes anomalias de irídio nestas amostras, o que pode estar relacionado com o tipo de corpo extraterrestre que nessa altura atingiu a Terra. Todavia, estes são apenas alguns resultados que têm vindo a ser obtidos; seguramente que trabalhos que se

---

[1] A platina, com símbolo químico Pt e número atómico 78, é um dos elementos mais raros na crosta terrestre, onde ocorre em concentrações de, apenas, 0,005 ppm (partes por milhão). A maior parte da platina chegou à Terra na fase inicial da sua formação (período de acreção), há cerca de 4,5 mil milhões de anos, integrada nos objectos astronómicos que com ela colidiam. Sendo muito densa (mais de 21.45 g/cm3) e muito pouco reactiva, na fase de diferenciação da Terra em núcleo e manto, a quase totalidade da platina ficou integrada no núcleo (o que explica a sua raridade na crosta). Porém, ao longo do tempo, continuou a chegar à Terra, embora em pequenas quantidades, integrada nos objectos espaciais que com ela colidem. Por isso, anomalias dos teores de platina na sequência estratigráfica são, em geral, conotadas com impactos de corpos extraterrestres.

realizarão no futuro próximo permitirão perceber bastante melhor o que se passou nesta altura e que tão grandes consequências ambientais induziu.

Embora tenham vindo a ser realizados vários trabalhos incidindo em diversos indicadores, um dos que tem vindo a merecer grande atenção dos investigadores é a presença de nanodiamantes[1]. Recentemente, em 2014, uma equipa constituída por Charles R. Kinzie, da Universidade de Chicago, e outros 25 investigadores, fizeram a síntese dos conhecimentos sobre os nanodiamantes desta idade, realizando bastante mais trabalho complementar, tendo chegado à conclusão de que foram já detectados em sedimentos de 24 locais situados em países de 4 continentes, nomeadamente nos Estados Unidos da América, no Canadá, na Groenlândia, na Holanda, na Bélgica, na Alemanha, em Espanha, na Grã-Bretanha, na Síria e no México (figura II.X29). Através de evidências isotópicas, concluíram ainda que estes nanodiamantes foram produzidos a partir de carbono terrestre, como é normal acontecer com os diamantes de impacto, não derivando, portanto, do corpo extraterrestre.
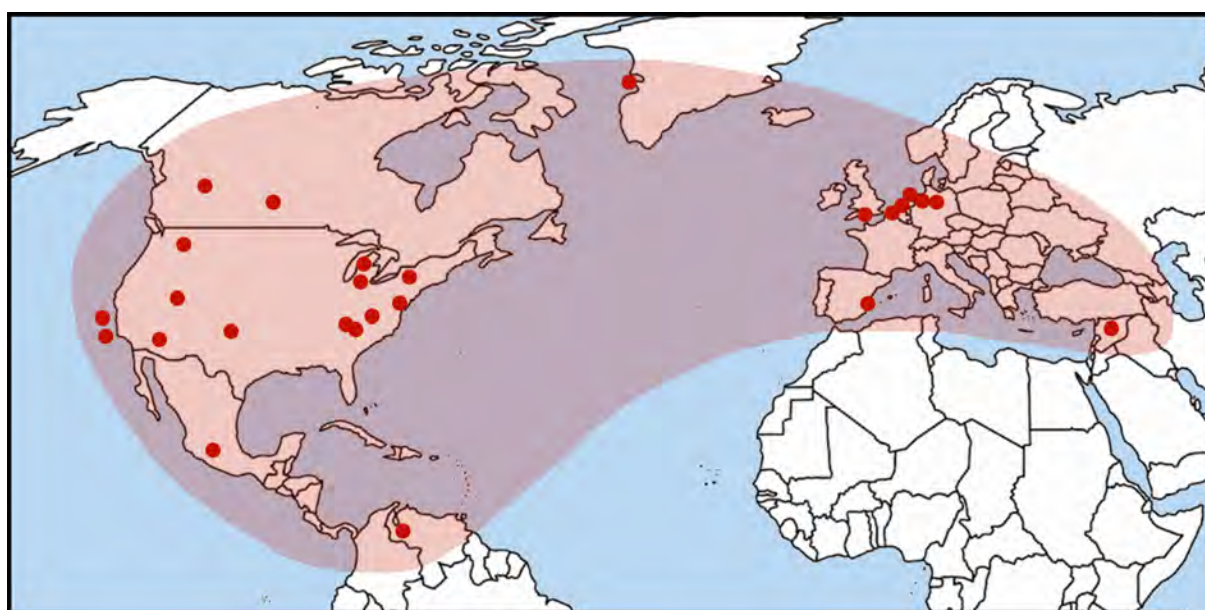
Figura II.30 – Locais onde já foram encontrados nanodiamantes em sedimentos do início do Dryas Recente. A mancha rosada indica a área de distribuição destes impactitos deduzida desses locais.

Na ausência de uma grande cratera associada a este impacto (que pode existir e não ter sido ainda identificada), grande parte dos investigadores inclina-se para a ocorrência da explosão do corpo extraterrestre na atmosfera, muito provavelmente sobre o Canadá ou na região dos Grandes Lagos, sendo provável que os fragmentos resultantes tenham provocado grande número de pequenas crateras. É de relevar que a existência deste grande evento foi proposta

[1] Pequenos diamantes associados a impactos foram noticiados pela primeira vez por Albert E. Foote (1846-1896), em 1891, num artigo sobre a cratera de Barringer (*Meteor Crater*). Posteriormente, estes impactitos foram encontrados em muitos outros depósitos relacionados com a colisão de corpos extraterrestres, nomeadamente na dependência da grande cratera de Popigai, na Sibéria. Com a evolução tecnológica, é agora possível encontrar estes pequenos diamantes, muitas vezes com dimensões inferiores a um micrómetro, pelo que adquiriram a designação de nanodiamantes. São bastante diferentes dos diamantes "normais", que se formam no manto terrestre, a profundidades da ordem de 150 a 200 km, sob pressões e temperaturas extremamente elevadas, em que carbono é lentamente (ao longo de muitos milhões de anos) convertido nesta espécie mineralógica. Pelo contrário, os nanodiamantes são normalmente gerados à superfície ou na baixa atmosfera, de forma quase instantânea, quando as enormes temperaturas resultantes de impactos transformam a estrutura cristalina do carbono. Estes nanodiamantes podem também ser produzidos por explosões nucleares.

ainda há pouco tempo (2007), e a devida consubstanciação científica é um processo moroso, que, em geral, demora muitos anos. Por outro lado, há que ter em consideração que, há 12 900 anos, grande parte da América do Norte estava ainda coberta por gelos glaciários, com alguns quilómetros de espessura, o que pode ter obliterado muitas das pequenas crateras resultantes, ou provocado a sua erosão pela drenagem hídrica resultante da deglaciação. De facto, o conhecimento que temos deste impacto é ainda bastante limitado, e envolto em polémicas. Para alguns investigadores, tratou-se de um impacto meteorítico, embora uns se inclinem para um do tipo metálico e outros para um condrito. Para muitos outros investigadores, o evento decorreu do impacto de um cometa. As estimativas da dimensão do corpo impactante são, também, muito variáveis (até porque os cálculos dependem da composição do objecto), oscilando entre diâmetros de 1 km até aproximadamente 10 km.

Mesmo assim, continua-se a procurar activamente crateras que possam ter resultado deste impacto ou dos fragmentos resultantes da possível explosão aérea. Vários autores interpretam desta forma várias depressões ovais existentes na metade oriental dos Estados Unidos da América, o que foi também sugerido em 2007, no artigo inicial de Richard B. Firestone e colegas. Tais depressões peculiares são apelidadas, em termos gerais, por "Baías da Carolina", normalmente mais conhecidas pela designação inglesa de *Carolina Bays* (Figura II.31).
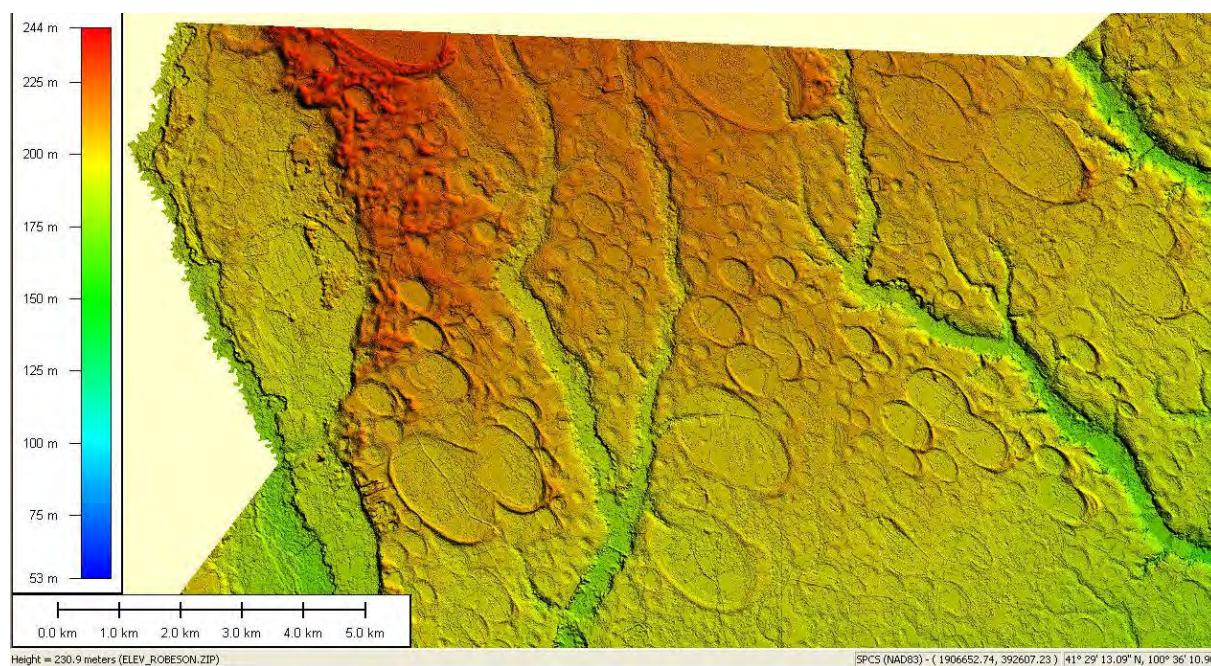
Figura II.31 – Imagem LIDAR[1] das *Carolina Bays* em Robeson County, na Carolina do Norte.

Trata-se, como se referiu, de depressões elípticas existentes ao longo de quase toda a costa atlântica, como em New Jersey, no Delaware, em Maryland, na Virgínia, na Carolina do Norte, na Carolina do Sul, na Geórgia e no norte da Florida, mas existem também mais para Oeste, nomeadamente no Nebrasca, no Kansas e no Novo México. A designação genérica provém dos estados da Carolina (do Norte e do Sul), mas, com frequência, adquirem também

[1] LIDAR, acrónimo de *Light Detection And Ranging*, é uma tecnologia que começou a ser desenvolvida na década de 60 do século passado, que combina técnicas de laser e de radar para produzir mapas com elevada resolução. É actualmente muito utilizada a partir de meios aéreos para, rapidamente e com grande precisão, fazer a cartografia de vastas áreas.

nomes específicos adequados ao estado em que ocorrem. Na zona costeira estão identificadas cerca de 500 mil destas depressões, com dimensões variadas, com frequência ocorrendo em grupos, e tendo a maior parte os eixos maiores orientados de forma coerente, ou seja, para Noroeste, rodando de WNW na parte norte para NNW na parte sul. De acordo com alguns investigadores, os eixos maiores das elipses que formam o contorno dessas depressões indicariam a direcção do impacto principal, pois que resultariam da incidência oblíqua dos fragmentos aludidos. A projecção desses eixos parece cruzar-se no centro do Michigan, na zona dos Grandes Lagos, o que sugere que este foi o ponto de impacto (explosão) do meteorito ou cometa original. Porém, esta hipótese tem vindo a ser contestada por vários outros investigadores, apontando para tal a existência de inconsistências cronológicas e deficiências de indicadores de impactos. Muito trabalho precisa ainda de ser realizado até se poder adquirir uma melhor percepção do que então se passou. O que parece certo é que, há cerca de 12 900 anos algo proveniente do espaço parece ter colidido com o nosso planeta.

Qual foi a causa principal das mudanças climáticas abruptas que marcaram o final da última glaciação e as consequentes alterações ecossistémicas que conduziram à extinção dos grandes mamíferos terrestres e modelaram o mundo de forma a proporcionar a evolução do Homem no sentido de começar a domesticar plantas e animais e a iniciar uma vida social radicada no sedentarismo, é assunto que está ainda em aberto. Parece ser indubitável que essa altura foi marcada por causas endógenas importantes, das quais releva a interrupção ou forte atenuação da circulação termohalina, em que a brusca drenagem para o oceano de grandes lagos glaciários, como o Lago Agassiz, teve grande importância. Os indicadores existentes apontam, também, nessa altura, para o forte impacto de um corpo extraterrestre (meteorito ou cometa) no Hemisfério Norte, abrangendo a região onde é produzida a Água Atlântica de Fundo, motor principal da circulação termohalina, que eventualmente pode ter induzido um "inverno meteorítico", responsável pelo regresso a condições glaciais. Não é de descartar, também, a existência de coincidências, que não são raras na história da Terra e que, portanto, os dois eventos (um de ordem endógena e outro exógeno) tenham ocorrido quase sincronicamente, suscitando consequências, no sentido do rápido arrefecimento climático, que se potenciaram entre si. Mas o objectivo da Ciência é precisamente esse: esclarecer e ajudar a perceber o que é ainda desconhecido. Por certo que, com os trabalhos que continuam intensamente a ser desenvolvidos, em breve saberemos bastante mais do assunto, e poderemos ter uma percepção mais clara dos acontecimentos que marcaram o final do Plistocénico[1], há 11 700 anos, e permitiram a evolução para o mundo tal como o conhecemos, de cujas características estamos profundamente dependentes.

II.7.3.6. O Impacto de Tunguska, em 1908

Já no ponto II.6.5. fizemos alusão a este evento. Pela 7 horas da manhã do dia 30 de Junho de 1908, na zona de Tunguska, na região central de Sibéria, a cerca de mil quilómetros a NNW do Lago Baikal, uma bola de fogo cruzou o céu e, a certa altura, verificou-se uma grande explosão que foi ouvida a mais de 1 200 km de distância. Tendo ocorrido numa região

---

[1] Plistocénico, que também pode ser grafado Pleistocénico, é a época geológica que decorreu entre há 2,58 milhões de anos e 11 700 anos (segundo a Carta Cronoestratigráfica Internacional de 2016). O termo deriva do grego πλεῖστος [pleistos] = "o mais" + καινός [kainós] = "novo", "recente", significando portanto a época mais recente. Sucedeu ao Pliocénico, do grego πλεῖον [pleion] = "mais" + καινός [*kainós*] = "novo", que decorreu entre há 5,33 e 2,58 milhões de anos. Foi sucedido pelo Holocénico, do grego ὅλος [*hólos*] = "todo" + καινός [*kainós*] = "novo", que se iniciou há 11 700 anos e se prolonga pelos nossos dias. Há, assim, uma sucessão etimologicamente interessante de épocas: Pliocénica, que é "mais recente", Plistocénica, que é "a mais recente" e Holocénica, que é a "totalmente recente".

escassamente populada, e sendo as comunicações na altura, como é óbvio, muito mais difíceis do que são hoje, o evento passou quase despercebido, embora várias estações meteorológicas na Europa tenham registado ondas sísmicas e anomalias de pressão e, nos dias seguintes, tenham sido observados fenómenos atmosféricos estranhos, para os quais não se encontrou, então, explicação convincente.

Convém recordar que a Sibéria era uma região de acesso muito difícil, e que, nos anos seguintes, a Rússia passou por uma série de convulsões bélicas e políticas, bem como uma prolongada guerra civil (entre as quais, a 1ª Guerra Mundial de 1914-1918, a revolução socialista de 1917, a abdicação e posterior execução do czar Nicolau II em 1918, e a guerra entre os vermelhos bolcheviques, os "brancos" anti-socialistas e socialistas não bolcheviques, que se prolongou até 1922). Na fase final deste período conturbado, em 1920, o mineralogista russo, nascido na Estónia, Leonid Alekseyevich Kulik (1883-1942), que tinha ido para o Museu Mineralógico de São Petersburgo (cujo nome mudou posteriormente para Leninegrado), sendo uma das suas tarefas a de localizar e examinar meteoritos que tivessem caído na União Soviética. Foi ao consultar jornais antigos que Kulik se apercebeu de que algo inusitado tinha ocorrido, em 1908, na parte central da Sibéria, tendo-se convencido que tal teria correspondido à queda de um enorme meteorito. Assim, Tunguska passou a estar integrada na expedição que, em 1921, empreendeu à região. Porém, a região é tão remota e as condições eram tão difíceis, que esta primeira expedição não conseguiu chegar à área da explosão, embora tenha recolhido depoimentos e outros indícios que suportavam a hipótese de uma colisão meteorítica.

Em 1927 Kulik empreendeu nova expedição à região e, a 13 de Abril, atingiu a periferia da floresta que tinha sido devastada pela explosão, verificando que as árvores tinham sido completamente derrubadas para o mesmo lado (figura II.32). Prosseguindo a exploração desta área de floresta com árvores caídas, verificaram que a inclinação destas seguia um padrão regional radiante, o que lhes permitiu deduzir o local central onde se tinha verificado o impacto. Agora já com um vasto conjunto de informações, incluindo fotografias, Kulik voltou a Leninegrado, conseguindo convencer mesmo os seus colegas mais cépticos de que algo inusitado, provavelmente a queda de um grande meteorito, teria acontecido, em 1908, no rio Tunguska. Tal facilitou a aprovação de mais duas expedições, uma entre Fevereiro de 1929 e Outubro de 1930, e outra em Julho e Agosto de 1938, na qual foi possível efectuar uma extensa cobertura fotográfica aérea. Todavia, nunca conseguiu encontrar material que permitisse comprovar que o evento tinha correspondido a um impacto meteorítico.
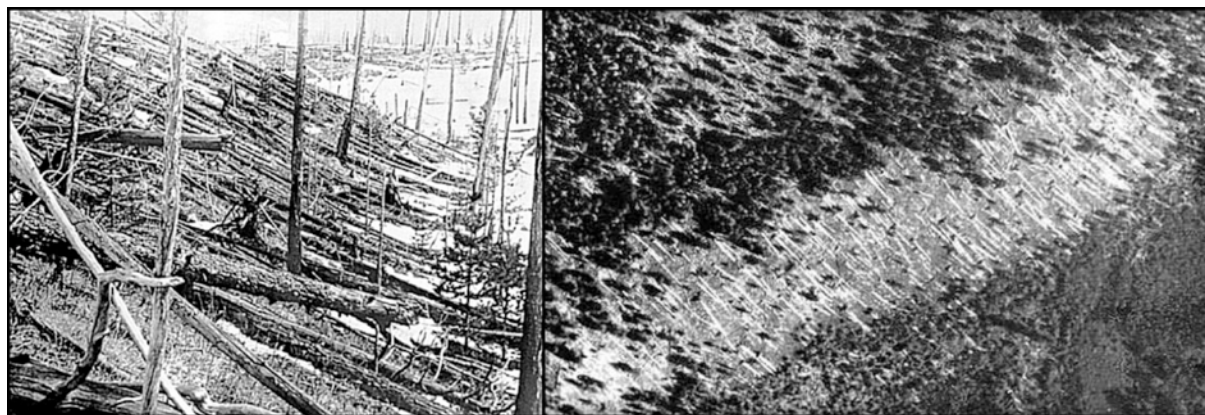
Figura II.32 - Fotografias da região de Tunguska em que são visíveis as árvores deitadas e a paisagem de desolação, mesmo décadas após o evento de 1908. À esquerda uma imagem obtida na expedição de Kulik. de 1927. À direita, vista aérea conseguida na expedição de Kulik. de 1938.

Os depoimentos obtidos por Kulik, publicados num artigo de 1927 (traduzido para inglês em 1935) são interessantes e reveladores da intensidade do evento. Um camponês relata que (...) *eram cerca das 8 da manhã* (...). *Sentei-me no alpendre com o rosto virado para norte. A certa altura, verificou-se uma conflagração que gerou tanto calor que era impossível permanecer sentado, e que quase me queimou a camisa.* (...) *essa conflagração durou apenas um tempo muito curto; só tive tempo para virar os olhos nessa direcção e ver o quão grande era, e passado um momento desapareceu.* (...) *Após isso começou a escurecer, e, ao mesmo tempo, houve uma explosão que me atirou para fora do alpendre numa distância de sete pés* [cerca de 2 m] *ou mais; mas não permaneci inconsciente por muito tempo; voltei a mim e havia um tal estrondo que todas as casas vibravam e pareciam que iam sair de suas fundações. Partiu os vidros e caixilhos das janelas das casas* (...). Outro entrevistado refere que (...) *toda a região central em que as árvores foram abatidas pelo vento era ocupada antes deste evento por um seu parente* [rico], (...) *que a utilizava como pasto para as* [suas cerca de mil e quinhentas] *renas* (...) *e tinha nesta região muitas cabanas onde guardava roupas, utensílios, equipamentos das renas, etc.* (...) *as renas vagueavam à vontade nas colinas da região* (...). [Com o evento] *as renas e as cabanas desapareceram. Foram procurá-las. De algumas renas encontraram os cadáveres carbonizados; das outras não encontraram nada. Das cabanas nada restou; tudo foi queimado e feito em pedaços: roupas, utensílios, equipamentos das renas, pratos e samovares; apenas encontraram alguns baldes intactos*.

Posteriormente a 1927, muito outros trabalhos foram realizados sobre o assunto. A área de floresta devastada atingiu cerca de 9 000 km^2, estando as árvores completamente derrubadas, como se referiu, no sentido contrário ao da explosão, o que permite identificar o local onde o evento ocorreu. Nesse local, as árvores estavam de pé, mas sem ramos nem casca, assemelhando-se a uma floresta de postes telefónicos. No total, centenas de milhares de árvores da floresta de coníferas que caracteriza a taiga foram arrancadas e derrubadas num raio de 30 a 40 km. Porém, os troncos e ramos maiores das árvores não foram totalmente queimados, mas apenas inflamados à superfície, o que sugere que foram submetidos a uma onda de calor escaldante, rápida e passageira, que, no entanto, parece não ter dado origem a grandes incêndios florestais. Tanto quanto se sabe, o evento não provocou vítimas, até porque a região tinha densidade demográfica extremamente baixa.

As estimativas da energia libertada pela explosão são, como é normal, muito variáveis, mas grande parte dos autores aponta para valores mais de mil vezes superiores à da bomba atómica de Hiroshima. Embora continuem as discussões sobre o que realmente aconteceu em Tunguska, há actualmente um certo consenso de que correspondeu à explosão e desintegração de um grande bólide (meteorito, asteróide ou cometa), que ocorreu entre 5 e 10 km de altitude. Também como é normal, as dimensões do objecto variam de acordo com as diferentes estimativas, oscilando entre 30 e 190 metros (até porque tal depende do tipo de objecto considerado). Como já se aludiu, embora não haja cratera de impacte, é considerado um evento de impacto.

Desde os anos 30 que se discute o evento de Tunguska, tendo sido formuladas hipóteses muito variadas, umas cientificamente mais consubstanciadas, outras do puro domínio da ficção. Em 1933 e 1934, respectivamente, dois investigadores, o russo Igor Stanislavovich Astapovich (1908-1976) e o norte-americano Fred Lawrence Whipple (1906-2004), trabalhando de forma independente, expuseram a teoria de que corresponderia à explosão de um cometa gasoso, o que explicaria a ausência de crateras de impacto. Para Whipple, o meteoro seria essencialmente um pequeno cometa, cuja cauda teria sido capturada pela atmosfera. Porém, o próprio autor refere que *não sinto muita confiança neste hipótese*. A hipótese de que o evento de Tunguska correspondeu (de uma ou de outra forma) à colisão de

um cometa continua ainda hoje a ser defendida por grande parte da comunidade científica, principalmente quando se tem em consideração que o núcleo cometário consiste numa grande bola constituída por poeiras e rochas misturadas com água, metano, amónia e outros gases congelados.

Outras hipóteses têm vindo a ser formuladas, como a apresentada em 1960 por J. N Hunt e colegas, segundo a qual a explosão poderia corresponder à de uma massa critica de material extraterrestre fissionável, ou a de Clyde Cowan e colaboradores, de 1965, que pressupõe que um objecto composto por anti-matéria foi aniquilado na atmosfera acima de Tunguska, ou a de 1973, de A. A. Jackson e M. P. Ryan, que sugere que um buraco negro de massa sub-estelar, poderia explicar muitos dos mistérios associados com o evento, ou até mesmo a aventada em 1976 por John Baxter e Thomas Atkins, que postulam que o evento poderia ter correspondido à explosão de uma nave extraterrestre (o que teve impactos assinaláveis nalguns meios de comunicação social).

Embora, tanto quanto se saiba, o evento de Tunguska tenha sido o maior impacto de um objecto extraterrestre registado no decurso dos tempos históricos, tratou-se de um corpo relativamente pequeno. Parece não ter induzido consequências notórias no clima. Os efeitos conhecidos são essencialmente de índole meteorológica. Por exemplo, na conceituada revista *Nature* de 9 de Julho de 1908, Bohuslav Brauner, da Universidade Boémia de Praga, reporta que *O fenómeno peculiar da luz à meia-noite no dia 30 de Junho, que foi visto, de acordo com os jornais,* (...) *em Copenhaga, Königsberg, Berlim, Viena, Biala, e em outros lugares, também foi observado por mim em Praga. À 1h e 30m do dia 1 de Julho, vi na direcção NE e NNE uma forte luz peculiar laranja-amarelo no horizonte, mais laranja nas partes mais baixas e mais amarela nas superiores* (...), e W. F. Denning, de Bristol, refere que *a 30 de Junho o firmamento estava anormalmente luminoso, com um brilho muito forte, à meia-noite, na parte norte. Poucas estrelas conseguiam ser vistas, e a Via Láctea era dificilmente distinguível. A 1 de Julho, os fenómenos da noite anterior repetiram-se, mas com um aspecto diferente: havia muitas nuvens de vários matizes, e a luz era, de novo, intensamente forte, estando o céu do norte envolvido numa aurora brilhante*. Neste e nos números seguintes da revista surgem notícias semelhantes, sem qualquer explicação convincente (pois que o evento de Tunguska era desconhecido). Com efeito, na imprensa da época, o fenómeno é prodigamente relatado, referindo-se que, em muitas regiões da Ásia e da Europa, à noite, o céu estava brilhante, de tal modo que há relatos de pessoas conseguirem ler os jornais à meia-noite sem qualquer tipo de iluminação artificial.

Entre as interpretações explicativas para esta luminosidade nocturna ressalta a apresentada em 1962 e 1966 pelo astrofísico soviético Vasiliy Grigorievich Fesenkov (1889-1972), que refere que *A explicação mais provável para as noites anormalmente brilhantes associados com a queda do meteorito de Tunguska parece ser a de que o meteorito era, na realidade, um pequeno cometa com a cauda de poeira dirigida para o lado contrário ao do Sol*. Baseia-se no facto de que não há relatos de tal luminosidade nocturna na América do Norte, no Hemisfério Sul e em países situados a oriente do local da colisão.

Nos Estados Unidos da América, em vários observatórios, verificou-se durante alguns meses diminuição da transparência atmosférica devido ao aumento de poeiras em suspensão. Só passadas décadas é que se começou a perceber que estes efeitos estavam relacionados com o evento de Tunguska.

Segundo alguns investigadores, a desintegração aludida e a integração quase instantânea de grande quantidade de partículas finas dela resultante na troposfera teria provocado modificações na estrutura da atmosfera, e influenciado as células de circulação. Tal poderia

ter funcionado como catalisador do aumento global da temperaturas. O assunto não está, ainda, suficientemente esclarecido, até porque só se começou a ter a percepção do que aconteceu quase 28 anos depois do evento. Continuam-se a discutir as causas e os contornos desta mega-explosão, e os seus efeitos meteorológicos e climáticos só agora começam a ser estudados pormenorizadamente.

II.7.3.7. O meteoro de Chelyabinsk, de 2013

Apesar de, que se saiba, não ter induzido consequências climáticas significativas, o meteoro que entrou na atmosfera e explodiu sobre a cidade de Chelyabinsk, na Rússia, a oriente das Montanhas dos Urais, por volta das 09:20 da manhã do dia 15 de Fevereiro de 2013, tem o interesse particular de ter sido o primeiro da história a ser filmado (figura II.33). Demonstra, também, que a qualquer altura e em qualquer lugar do mundo se pode verificar a queda de um objecto astronómico não antes identificado (pois que foi detectado apenas algumas horas antes da colisão). O meteoro de Chelyabinsk era um pequeno fragmento proveniente de um asteróide bastante maior. Deslocava-se na atmosfera a quase 20 km/s e acabou por explodir a uma altitude entre 30 km e 45 km, provocando uma forte onda de choque e múltiplos fragmentos, parte dos quais acabou por atingir a superfície (na altura coberta por neve e gelo), isto é, originaram a queda de muitos pequenos meteoritos.
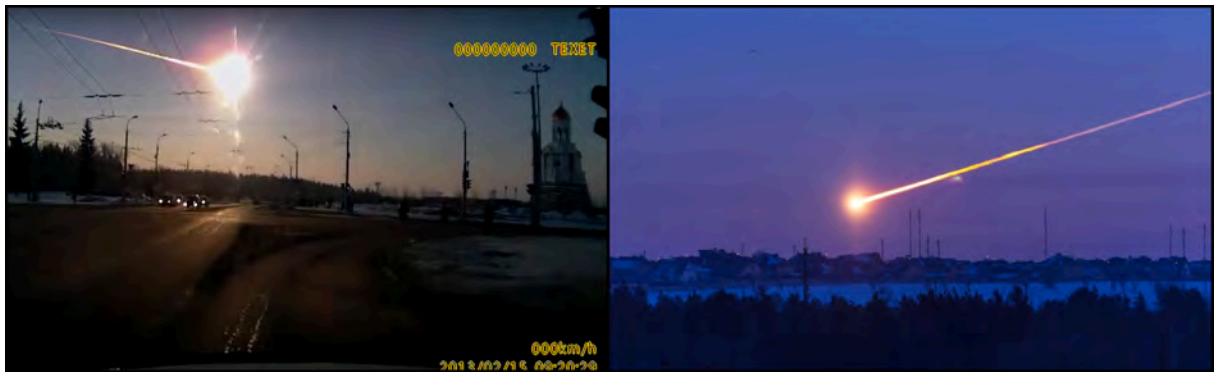
Figura II.33 – Fotogramas de vídeos que registaram a colisão do meteoro de Chelyabinsk, na Rússia.

Foram, até agora, recuperados mais de mil desses pequenos meteoritos, com um peso total superior a 6 kg, mas o que parece ser a peça principal, com massa muito maior, foi detectada no próprio dia do impacto. Com efeito, algumas horas depois da explosão, pescadores locais encontraram, na superfície gelada do Lago Chebarkul, aproximadamente 70 km a NE de Chelyabinsk, um buraco com cerca de 6 metros de diâmetro, que se suspeitou logo ter sido provocado pelo meteorito principal. Nesses mesmo dia, cientistas da Universidade Federal dos Urais colectaram 53 amostras nas proximidades desse buraco no gelo, todas com dimensão inferior a um centímetro, cuja análise laboratorial revelou serem de origem meteorítica. A 16 de Outubro de 2013, o fragmento muito maior acabou por ser recuperado, verificando-se que pesava cerca de 570 kg (figura II.34).

O grande conjunto de dados referente a esta colisão, em que relevam os deduzidos das análises das imagens que então foram obtidos por câmaras de vigilância e instaladas em viaturas (mais de 400), permitiu rapidamente conhecer muitos pormenores do corpo que colidiu com a Terra e da forma como essa colisão se processou. Poucos meses após o evento já havia várias publicações científicas sobre o assunto.

Estima-se que o bólide tinha cerca de 19 metros e, pelos cálculos efectuados em 2013 pelo astrónomo checo Jiří Borovička e colegas, era possivelmente um pedaço do asteróide 86039 (1999 NC43), um dos chamados Objectos Próximos da Terra[1], que tem diâmetro de cerca de 2,2 km e foi descoberto em 1999. Ao penetrar na atmosfera correspondia a um corpo único, embora já fracturado (portanto, com zonas de fraqueza). Com o aumento da pressão dinâmica ao atravessar a atmosfera, a primeira perda de massa significativa ocorreu a uma altitude de cerca de 45 km, mas a maior parte da fragmentação ocorreu a altitudes entre 40 e 30 km (segundo a análise acústica, verificaram-se 11 fragmentações individuais). Aos 29 km, o asteróide tinha-se já fragmentado em cerca de 20 elementos com mais de 10 toneladas, o maior dos quais teria 23 toneladas. A aproximadamente 25 km de altitude estes grandes blocos começaram a fragmentar-se de novo, mas o corpo principal permaneceu intacto e bastante maciço (embora com massa reduzida já para 10 toneladas) até aos 22 km, quando ocorreu nova fragmentação, de forma que o maior elemento, a 17 km de altitude, teria apenas 15 kg. O maior fragmento sobrevivente do objecto que penetrou na atmosfera (provavelmente o meteorito que foi recuperado no Lago Chebarkul), não provém do o corpo principal da desintegração, mas de um dos outros blocos resultantes, que se desintegrou a uma altitude de cerca de 25 km. O pormenor com que se conseguiu analisar este evento constitui um importante contributo para perceber melhor o comportamento e fragmentação dos meteoros quando atravessam a atmosfera terrestre, o que pode constituir informação de grande valia, nomeadamente para a protecção civil.

A explosão aérea do meteoro correspondeu à libertação de uma grande quantidade de energia. Num artigo publicado em finais de 2013 pelo físico canadiano Peter G. Brown e seus 32 co-autores, estima-se que essa energia foi equivalente a aproximadamente 500 kilotoneladas de TNT (mais de 30 vezes superior à da bomba atómica *Little Boy* largada em Hiroshima em 6 de Agosto de 1945). Porém, a maior parte dessa energia foi absorvida pela atmosfera, e a explosão não provocou directamente acidentes pessoais. Contudo, indirectamente, teve consequências significativas: por um lado gerou pânico na população; por outro, cerca de milhar e meio de pessoas teve que receber tratamento hospitalar devido a lesões provocadas principalmente por estilhaços dos vidros das janelas, que se partiram com a onda de choque. Refira-se, ainda, que muitos dos edifícios foram bastante danificados por essa onda de choque, o que causou problemas relevantes, tendo de ser reparados muito rapidamente, dado que as temperaturas na altura eram negativas.

[1] "Objectos Próximos da Terra" (*Near-Earth Objects* na expressão inglesa), são pequenos corpos do Sistema Solar (meteoróides, asteróides e cometas) que, devido à atracção gravitacional de planetas próximos, ficam com órbitas que os colocam na proximidade da Terra, ou seja, a menos de 1,3 unidades astronómicas do Sol (isto é, a menos de 1,3 da distância entre a Terra e o Sol). Conhecem-se actualmente mais de 15 mil destes objectos, mas o número aumenta bastante (mais de um milhar) a cada ano que passa. Cerca de mil desses corpos têm dimensões superiores a 1 km.

Figura II.X33 – Direita: buraco feito no Lago Chebarkul, que estava gelado, pelo meteorito maior proveniente do objecto que colidiu em Chelyabinsk. Esquerda: momento de recuperação do meteorito.

Inicialmente pensou-se que o bólide de Chelyabinsk poderia estar relacionado com o asteróide 2012 DA14 (baptizado com o nome Duende [367943 Duende]), que nesse mesmo dia de 15 de Fevereiro de 2013 passou a apenas 27 700 km da superfície da Terra. Refira-se que esta distância é extremamente pequena em termos astronómicos. Na realidade, passou mais perto da Terra do que estão os satélites geossíncronos (normalmente satélites de comunicações e meteorológicos), cujas órbitas se localizam a cerca de 35 000 km, mas longe da maioria dos satélites, incluindo a Estação Espacial Internacional, que se situa apenas a uma altitude ligeiramente superior a 400 km. A hipótese dos objectos estarem relacionados advinha do facto de, com frequência, cometas e asteróides sujeitos a forças gravitacionais de planetas próximos acabarem por se fracturar, passando os fragmentos resultantes a seguir órbitas semelhantes.

Rapidamente se concluiu que os dois corpos astronómicos (o de Chelyabinsk e o 2012 DA14) não estavam relacionados, tratando-se a passagem no mesmo dia de simples coincidência, até porque as suas trajectórias eram opostas: a do meteoro de Chelyabinsk, até como se vê nos vídeos, era de Norte para Sul, enquanto que a do asteróide 2012 DA14 era de Sul para Norte.

Refira-se que o asteróide 2012 DA14 é um pequeno corpo do vasto conjunto de Objectos Próximos da Terra, que foi descoberto em 2012 por astrónomos amadores espanhóis. Inicialmente a sua dimensão foi estimada em cerca de 45 metros, mas as observações efectuadas durante a passagem de 2013, nomeadamente com técnicas radar, revelaram que se trata de um corpo oblongo, com 40 m x 20 m. O período da sua órbita, que tinha sido calculado em cerca de 316 dias, foi encurtado devido à passagem tão próxima da Terra, estimando-se que agora seja de apenas de uns 317 dias. A próxima passagem do 2012 DA14 na adjacência da Terra está prevista para 2046, a uma distância superior a 2 200 km, portanto muito para lá da órbita da Lua (que orbita, em média, a cerca de 384 mil quilómetros). A tangente seguinte verificar-se-á, apenas, em 2 123, em que, segundo os cálculos, passará a apenas 30 000 km do nosso planeta. Todavia, sabemos que as órbitas destes pequenos objectos são sujeitos a perturbações devido a interferências gravitacionais dos planetas e outros corpos celestes, pelo que as projecções aludidos podem ser significativamente modificadas a qualquer altura. Por outro lado é preciso ter consciência que o asteróide 2012 DA14 é apenas um dos pequenos "Objectos Próximos da Terra", havendo vários milhares de outros, grande parte dos quais (a maioria?) não foram ainda detectados.

II.7.4. Colisões com outros corpos celestes, clima e riscos para a sociedade

II.7.4.1. Os milhões de corpos celestes do sistema solar

O sistema solar é constituído pela nossa estrela central, o Sol, e por 8 planetas com características distintas, cujas órbitas estão relativamente estabilizadas. Esta é uma concepção redutora do nosso sistema, pois que é também constituído por largas dezenas de milhares (ou mais) de outros corpos menores, cujas órbitas são frequentemente alteradas por interacções gravíticas com os planetas e entre eles próprios, bem como por várias perturbações de índole galáctica. Acresce que, por vezes, há colisões entre esses corpos, do que resulta a sua fragmentação e, portanto, a criação de múltiplos novos pequenos corpos com órbitas distintas dos originais. Assim, estando a Terra integrada no sistema solar, vagueia no espaço em conjunto com uma quantidade muito grande de outros corpos, alguns dos quais, em geral bastante pequenos, todos os anos entram na atmosfera terrestre, aí se desintegrando, mas, por consequência, aí deixando as poeiras e gases em que se transformaram, o que, por via de regra de forma quase irrelevante, tem algumas consequências climáticas. Com efeito, a Terra está constantemente a sofrer a colisão com outros corpos celestes

Entre estes corpos ressaltam os da já aludida cintura de asteróides, compreendida aproximadamente entre as órbitas de Marte e de Júpiter, de que se conhecem actualmente centenas de milhares, embora se estime que o número total ascenda a vários milhões. Os corpos celestes desta cintura têm dimensões muito variadas: não considerando os que têm ordem inframétrica (por vezes centimétrica), pensa-se que a grande maioria são de tamanho métrico (até às dezenas de metros). Todavia, outros, são muito maiores, como é o caso de Ceres[1], com diâmetro de quase mil quilómetros, e de Vesta[2], com dimensão média de cerca de 530 km. Com alguma frequência, as órbitas dos asteróides levam-nos a colidir com o nosso planeta: se são pequenos, as consequências não são, em geral, graves; todavia, esporadicamente, como se referiu nos pontos anteriores, correspondem a objectos maiores (por vezes de ordem quilométrica), e nestes casos induzem normalmente modificações climáticas bruscas.

Porém, muitos dos objectos que colidem com a Terra são originários de zonas do sistema solar muito mais longínquas, como acontece com os que provêm do também já referido Cinturão de Kuiper-Edgeworth, existente para lá da órbita de Neptuno, que se estima ser 20 vezes mais larga e ter cerca de 200 vezes mais massa do que a cintura de asteróides. Como é evidente, ressonâncias gravíticas fazem com que os corpos aqui existentes alterem, com frequência, as órbitas, adquirindo percursos que passam pelo sistema solar interior. Muitos dos objectos que entram em colisão com a órbita da Terra, principalmente cometas, mas também asteróides, têm origem nesta cintura de Kuiper.

Mas para lá da cintura de Kuiper, existe o chamado Disco Disperso, que na parte interna penetra na cintura referida, mas que se prolonga muito para lá dos limites desta, até enormes distâncias do Sol (mais de 100 unidades astronómicas). Embora ainda seja mal conhecido, sabe-se que existem também aqui muitos milhares de objectos, vários dos quais do tipo

---

[1] Ceres foi descoberto em 1801 pelo padre e astrónomo italiano Giuseppe Piazzi (1746-1826). Inicialmente foi considerado como planeta, mas posteriormente foi integrado na categoria dos asteróides. Em 2006 foi classificado como planeta anão. Que se saiba, é o 33º maior corpo do sistema solar.

[2] Vesta foi descoberto em 1807 pelo físico e astrónomo alemão Heinrich Wilhelm Matthias Olbers (1758-1840). É o segundo maior asteróide conhecido na cintura de asteróides. Como resultado dos dados obtidos em 2011 e 2012 pela sonda Dawn da NASA (lançada em 2007), Vesta é agora considerado como protoplaneta.

planeta anão, embora completamente gelados. Ao contrário dos objectos das zonas a que temos vindo a fazer alusão, que se situam mais ou menos no plano da eclíptica, os corpos do disco disperso têm órbitas que, com frequência, são bastante inclinadas relativamente à eclíptica e, por vezes, muito excêntricas. Pensa-se que tal se deve à grande distância a que se localizam do Sol, da influência gravitacional dos planetas gigantes gasosos (com maior relevância para Neptuno), e das ressonâncias gravíticas entre eles. Devido à natureza instável das órbitas destes objectos, considera-se actualmente que grande parte dos cometas periódicos do Sistema Solar tiveram aqui origem.

Ainda mais longe, na zona de fronteira entre a heliosfera e o espaço interestelar (entre 50 mil e 20 mil unidades astronómicas afastada do Sol), situa-se a também já referida nuvem de Oort, cuja existência é, por enquanto, ainda bastante teórica, e que é caracterizada por duas regiões: a nuvem de Oort interna, em forma de disco que se distribui mais ou menos no plano da eclíptica; e a nuvem de Oort externa, que parece ser esférica. Também aqui existem largas centenas de milhares de objectos de dimensões muito variadas, nomeadamente planetesimais gelados, que devido a interferências gravitacionais podem mudar de órbita e, esporadicamente, serem lançados em direcção ao sistema solar interno. Pensa-se actualmente que os cometas de longo período (como o cometa Hale–Bopp[1]), que demoram milhares de anos a descrever a órbita, têm origem na nuvem de Oort.

Se nos alongámos um pouco mais sobre este assunto foi porque consideramos importante que se tenha a percepção que existem no sistema solar milhões de objectos de dimensões extremamente variadas, que em qualquer altura podem entrar em rota de colisão com a Terra. No caso de serem corpos maiores ou conjuntos de objectos menores, podem, como já aconteceu no passado, provocar mudanças climáticas abruptas e, mesmo, induzir grandes alterações da vida no nosso planeta.

II.7.4.2. Vigilância e prevenção de colisões

Pode dizer-se que, desde que há registos escritos, há relatos de "pedras" que caíram do céu. Todavia, só no século XVIII é que a comunidade científica reconheceu a origem extraterrestre dos meteoritos e, portanto, só a partir dessa altura é que se começou a dar mais atenção ao assunto. Mesmo assim, só na 2ª metade do século XX, com os trabalhos sobre a *Meteor Crater* e o impacto de Popigai, é que o assunto entrou na ordem do dia da Ciência internacional.

Que se saiba, não há registos de meteoritos terem atingido fatalmente pessoas. Porém, pode considerar-se que tal tem sido apenas uma questão de sorte. Tal deduz-se das notícias da imprensa relativas, por exemplo, a alguns casos ocorridos nos Estados Unidos da América: em 1938 um pequeno meteorito atravessou o telhado de uma garagem em Illinois; em 1954 um meteorito com 5 kg caiu no telhado de uma casa no Alabama, atravessando-a e penetrando até ao solo; em 1992 um pequeno meteorito destruiu um carro perto de New York City; em 2003 um meteorito com 20 kg atravessou uma casa de 2 andares na parte alta da cidade de

[1] O cometa Hale–Bopp, cuja designação científica é C/1995 O1, foi descoberto de forma independente, a 23 de Julho de 1995, pelos astrónomos norte-americanos Alan Hale (1958- …) e Thomas J. Bopp (1949- …). Tinha um brilho invulgarmente forte, e começou a ser visível a olho nu em Maio de 1996, e assim permaneceu durante 18 meses (excepto em Dezembro, devido ao alinhamento com o Sol). As observações efectuadas permitem deduzir que o núcleo tem entre 40 km a 80 km de diâmetro, que a sua órbita é quase perpendicular ao plano da eclíptica, tendo excentricidade de 0,995. Como, em Abril de 1996, passou relativamente perto de Júpiter, a influência gravitacional deste planeta teve como consequência uma redução do período orbital do cometa, que agora está estimada em cerca de 2 500 anos.

New Orleans. São apenas alguns exemplos que, apenas por acaso, não provocaram mortes. Entre muitas outras, e apenas a título exemplificativo, pode ainda referir-se a notícia proveniente da Índia, segundo a qual, em 2003, uma chuva de meteoritos destruiu várias casas e feriu 20 pessoas.

Desde há várias décadas que existe a preocupação em identificar e rastrear objectos que possam entrar em colisão com o nossos planeta. Há cada vez maior percepção de que o impacto de um grande objecto pode atingir proporções catastróficas, não apenas pelas súbitas modificações climáticas que pode induzir, mas também pelos riscos directos e indirectos para as populações, como, entre outras, as que derivam das ondas de choque atmosféricas e terrestres, do calor que é instantaneamente gerado, e dos grandes tsunamis que podem ser gerados (pois que, como a Terra é coberta, na maior parte, por oceanos, a probabilidade da queda de um grande objecto no mar é grande, o que provocará ondas de grande altura).

O sistema de detecção e vigilância tem vindo continuamente a aperfeiçoar-se, beneficiando, actualmente, de três factores principais: forte cooperação internacional, abrangendo tanto profissionais, como astrónomos amadores (que, na realidade, têm descoberto grande número de objectos extraterrestres); a constante evolução tecnológica que permite, agora, ter melhores equipamentos de detecção, e, com o progresso da informática, ter sistemas robotizados de detecção; uma rede de satélites e de sondas espaciais, cada vez mais alargada, que simplifica, em muitos casos, a identificação de corpos extraterrestres até aí desconhecidos. Graças a estes esforços cooperativos, pode dizer-se que a maioria dos asteróides com mais de 1 km estão assinalados, sendo cada vez maior o número de objectos menores que têm vindo a ser identificados. Todavia, tem de ser um esforço complexo e contínuo. Sempre que é detectado um novo objecto, tenta-se determinar as suas características e a sua órbita. Porém, como estas órbitas são frequentemente perturbadas por interacções gravitacionais com outros corpos, essas órbitas são alteradas, e como é impossível seguir em contínuo o percurso destes objectos (tanto por limitações tecnológicas, pois que, quando não são suficientemente grandes, deixam de ser visíveis quando se afastam mais da Terra, como por questões logísticas, visto que é impossível monitorizar em contínuo dezenas ou centenas de milhares desses pequenos corpos), é necessário que o sistema de detecção e vigilância existente seja cada vez mais aperfeiçoado.

Assim, não obstante os grandes avanços que têm sido conseguidos, e que, em princípio, nos permitem saber se algum grande asteróide entra em rota de colisão com a Terra, temos de estar constantemente preparados para a súbita colisão de um pequeno asteróide. Exemplo disso é o asteróide 2016 QA2, com tamanho entre 16 e 52 m (possivelmente duas vezes maior do que o de Chelyabinsk), que foi detectado pela primeira vez por um observatório brasileiro no dia 27 de Agosto de 2016. Poucas horas após, na noite de 27 para 28 de Agosto, passou vertiginosamente muito próximo do nosso planeta, a apenas pouco mais de 84 500 km, ou seja, a cerca de dois décimos da distância média entre a Terra e a Lua.

A colisão de pequenos asteróides como este pode gerar efeitos bastante danosos ou mesmo catastróficos a nível local. Basta imaginar um destes meteoros atingir, por exemplo, New York, nos Estados Unidos, ou São Paulo, no Brasil, onde a quantidade de edifícios muito altos é bastante elevada, grande parte deles revestidos por coberturas de vidro. Um acontecimento destes provocaria, seguramente, grande número de feridos (e, eventualmente, mortos). Com efeito, em panoramas urbanos como os aludidos, a propagação das ondas de choque seria profundamente afectada pela malha heterogénea de estruturas verticais, com fenómenos de concentração, dissipação e reflexão de energia. Tal aconteceria, também, *mutatis mutandis,* com a propagação do calor. Mas o maior número de vítimas adviria, talvez, dos estilhaços dos vidros partidos, muitos dos quais violentamente atirados pelas ondas de choque para o interior

dos edifícios, atingindo os ocupantes, e muitos outros caindo por vezes de grande altura sobre os transeuntes, presumivelmente em pânico.

Mas, em princípio, os grandes asteróides, cuja colisão com a Terra induziria mudanças climáticas abruptas, estão sob monitorização constante. Nesse aspecto, podemos estar relativamente tranquilos. No entanto, se um destes grandes corpos, por exemplo com dimensão superior a um quilómetro, entrasse em rota de colisão com a Terra, como nos poderíamos proteger e evitar situações catastróficas, nomeadamente as inevitáveis modificações climáticas extremamente rápidas? Aí, entramos no domínio da ficção científica, sendo muitos os livros e filmes que especulativamente abordam o assunto.

II.8. Epílogo

Como se tem vindo repetidamente a afirmar, o combustível que faz funcionar o grande motor climático é a energia radiante solar que chega à Terra, a este pequenino "pálido ponto azul", como, em 1994, foi designada por Carl Sagan, mas que é a nossa casa, o mundo em que nascemos, crescemos, nos reproduzimos e morremos, em que temos ilusões e decepções, êxitos e insucessos, conquistas e derrotas, e para o qual não existe qualquer alternativa viável (pelo menos nos próximos muitos decénios futuros). É a quantidade de energia radiante solar que chega a este "pálido ponto azul" que, na base, tem desde sempre determinado a evolução biológica e a sua diversificação, a qual acabou por produzir uma espécie singular dotada de capacidades cognitivas excepcionais, o *Homo sapiens*, isto é, nós próprios. Foi também essa quantidade de energia radiante que nos chega do Sol que, na base, determinou a evolução das sociedades humanas, com seus sucessos e fracassos, até chegarmos ao actual estado evolutivo social.

Porém, a aludida energia radiante solar é "apenas" o combustível do motor climático. Tal como numa viatura motorizada, a existência de combustível, embora seja condição imprescindível, não é suficiente para explicar o melhor ou pior funcionamento do motor. Há factores que perturbam a chegada de combustível (como a acumulação de detritos nos tubos de admissão e eventuais orifícios que provocam fugas) que fazem com que ao motor chegue mais ou menos combustível, e que, portanto, determinam o maior ou menor rendimento do seu funcionamento. Há, também, factores internos (como as velas mais ou menos sujas, folgas nos componentes, etc.) que implicam alterações na forma como o motor trabalha. E há, ainda, factores externos (entre muitos outros, a forma como o condutor dirige, o pressão e rastro dos pneus, e o estados das múltiplas peças que transmitem a energia do motor às rodas) que condicionam o funcionamento da viatura. Factores análogos afectam o funcionamento do motor climático, embora este seja muitíssimo mais complexo do que o de um simples motor de automóvel.

Nesta parte restringimo-nos quase essencialmente aos factores que fazem com que ao motor climático chegue mais ou menos energia radiante solar (ou seja, no exemplo aludido, que ao motor chegue mais ou manos combustível). Os outros factores serão mais pormenorizadamente abordados nas partes seguintes. Acresce que, o facto de, há uns 4,5 mil milhões de anos, a Terra ter sofrido a colisão com um grande planetóide (ponto II.2.1), que Alexander Halliday designou por Teia, determinou todo o futuro do planeta. Tal provocou a inclinação do eixo da Terra e, portanto, o aparecimento de estações do ano coerentes. Tal provocou, também, o nascimento da Lua, e o efeito de estabilização por esta induzido. Mesmo que muitos outros factores não existissem, a inclinação do eixo e a influência lunar seriam suficientes para induzir um clima complexo na Terra.

O clima é uma entidade extremamente complexa. É um sistema termodinâmico com três componente principais interdependentes: a aerodinâmica, a hidrodinâmica e a geodinâmica (isto para não entrarmos já na parte da glaciodinâmica e outras). Todavia, este sistema termodinâmico está totalmente dependente do calor que nele é introduzido a partir da fonte: o Sol. Como este é uma estrela da sequência principal de classe G, com os seus cerca de 4,6 mil milhões de anos, encontra-se actualmente na meia idade. Tal tem como consequência que a energia radiante que dele a Terra recebe tem vindo progressivamente a aumentar e continuará a ampliar-se no futuro (ponto II.3.2.). Há uns 3 mil milhões de anos o nosso planeta recebia apenas menos de 80% da que recebe actualmente. Aliás, este menor brilho do Sol deveria ter tido como consequência que a Terra, na altura, estivesse totalmente coberta por gelo, no estado designado por "Terra bola de neve"; porém, se tal aconteceu, tal verificou-se apenas de

forma esporádica, o que levou, em 1972, os astrónomos norte-americanos Carl Sagan e George Mullen a formularem o chamado “Paradoxo do Sol Jovem e Fraco” (ponto II.3.3), o que desde já permite realçar a importância climática dos factores endógenos, isto é, dos que estão exclusivamente relacionados com os processos decorrentes no nosso planeta (neste caso, ao que parece, relacionado com a abundância de gases de efeito de estufa na atmosfera). Com o Sol a aumentar progressivamente de brilho, pode dizer-se que a quantidade de combustível fornecido ao sistema climático terrestre tem sido cada vez maior (não tendo em consideração outros factores a que seguidamente aludiremos). É esta a linha de base, cuja variação é de muito longo período (da ordem das centenas de milhões de anos) sobre a qual actuam todos os outros agentes.

Como é evidente, a Terra é um planeta integrado no sistema solar, em que existem mais sete planetas, alguns com massas muito maiores do que a do nosso (como Júpiter e Saturno, cujas massas são, respectivamente, cerca de 318 e 95 maiores do que a da Terra), além de uma infinidade de outros corpos menores (planetas anões, asteróides, cometas, etc.). Desde 1687, quando Newton formulou da Lei da Gravitação Universal, que se sabe que todos estes corpos se influenciam uns aos outros, o que provoca alterações nas suas órbitas. É por isso que a Terra não descreve uma órbita circular em torno do Sol: essa órbita é complexa, com lentas perturbações mais ou menos periódicas, que convencionalmente se designam por movimentos. Embora haja outros, os principais são a a Excentricidade da Órbita (ponto II.4.6.), com periodicidades complexas de que avulta a de aproximadamente 400 000 anos e a de, *grosso modo*, 100 000 anos, a Obliquidade do Eixo (ponto II.4.5.), com período de aproximadamente 40 000 anos e a Precessão do Eixo de Rotação, também designado por Precessão dos Equinócios (ponto II.4.4.), com período de cerca de 26 000 anos. Como é evidente, cada um destes movimentos, por si só, provocaria alterações na quantidade de energia radiante que chega à Terra. Ou seja, sobre a linha de base correspondente ao aumento de energia radiante que chega à Terra devido ao progressivo aumento de brilho do Sol, que tem comportamento relativamente monótono, e se faz sentir em escalas da ordem das centenas de milhões de anos, sobrepõem-se as variações de cada um dos movimentos aludidos, que fazem com que tal energia radiante aumente ou diminua ciclicamente. Cada um deles tem forte potencial para induzir modificações climáticas com periodicidades que variam de poucas dezenas a várias centenas de milhares de anos. Todavia, como é lógico, essas modificações da órbita e da inclinação do eixo de rotação, tradicionalmente designados por Parâmetros de Milankovitch (ponto II.5.2.), actuam conjuntamente, e como os períodos são bastante diferentes, por vezes adicionam-se e, outras, atenuam-se, do que resulta uma curva complexa. Portanto, a radiação recebida pela Terra traduzida pela linha de base aludida, é fortemente perturbada por estes movimentos que fazem com que ao planeta chegue mais ou menos calor solar.

Mas, sobreposto a tudo o que acima se referiu, verifica-se que a radiação emitida pelo Sol tem variações de mais curto prazo, que de certa forma são expressas pelo número de manchas solares (ponto II.6). Simplificando, pode dizer-se que quando há mais manchas solares o Sol emite mais calor, e menos quando essas manchas são poucas ou ausentes. Sabe-se que o número de tais manchas atinge um máximo e um mínimo em períodos de cerca de 11 anos (Ciclos de Wolf), ou seja, mais ou menos a cada década a Terra tem anos em que a ela chega mais calor e, outros, em que a energia recebida do Sol é menor. São variações relativamente pequenas que, em princípio, têm reduzidas implicações climáticas. Contudo, outros ciclos de manchas solares têm potencial de regulação climática bastante mais acentuada, entre os quais os Ciclos de Gleissberg (com período médio de cerca de 80 anos), os Ciclos de Suess / de Vries (com peridiocidade de aproximadamente 200 anos, os Ciclos de Wheeler (da ordem dos 500 anos) e outros mais longos.

Assim, as variações da radiação solar recebida pela Terra que, basicamente, como se referiu, pode ser representada por uma linha de crescimento monótono, cuja expressão efectiva se faz sentir em escalas da ordem das centenas de milhões de anos, e que é perturbada pelos chamados Parâmetros de Milankovitch, com periodicidades que variam de poucas dezenas a várias centenas de milhares de anos, são suplementarmente amplificadas ou atenuadas por modificações do calor emitido pelo Sol, em prazos bastante mais curtos, que têm como proxy directo o número de manchas solares.

Atendendo a que as outras variações da radiação solar que chega à Terra actuam em escalas longas e muito longas comparadas com a da história das civilizações humanas, a evolução do clima durante os tempos históricos deve ter como parâmetro básico os ciclos das manchas solares. Desde meados do século XX tem-se tentado tipificar essa evolução climática histórica com base em períodos (entre os quais o Período Quente Romano, o Período Frio Medieval, o Pequeno Óptimo Climático, a Pequena Idade do Gelo, também conhecidos por outras designações). Porém, verifica-se que a definição desses períodos é vaga, havendo com frequência discussões e grandes incertezas sobre quando se iniciaram e quando terminaram. Felizmente, a Ciência está constantemente a progredir, desfazendo equívocos e indefinições, mas, e essa é uma das características do processo científico, por cada tema que fica mais esclarecido, surgem outras questões (que, com frequência, ignorávamos quase por completo) que carecem de ser devidamente averiguadas. No actual estado dos conhecimentos, começa a fazer pouco sentido continuar a utilizar os imperfeitamente definidos períodos climáticos acima aludidos; faz muito mais sentido recorrer aos ciclos de manchas solares, que apresentam correlações directas com esses períodos e os permitem definir e subdividir de forma bastante mais rigorosa. Porém, será preciso que decorra ainda bastante tempo para que tais conceitos cheguem a outras ciências, nomeadamente às humanas e sociais.

Compreendemos agora muito melhor como se processam as variações da radiação solar que atinge o nosso planeta. Seguindo o paralelismo utilizado no início, sabemos agora porque razão há alterações na quantidade de combustível que chega ao motor climático. Todavia, este é muito complexo. Por vezes, ao motor chega mais combustível, mas tal não se reflecte num melhor rendimento, pois que parte do combustível não é utilizado e, portanto, perde-se. É o que acontece, por exemplo, quando se verificam colisões de outros objectos celestes com a Terra (ponto II.7.3.), designadamente quando há impactos asteróides. Não só a composição e estrutura da atmosfera são alteradas (na esmagadora maioria dos casos de forma quase indetectável) como, no caso dos objectos maiores, se pode desenvolver um "Inverno Meteorítico" mais ou menos prolongado, com profundas implicações climáticas e biológicas.

Mas as próprias peças do motor podem fazer com que a forma como o combustível (a radiação solar) é utilizado se altere. Chegar à Terra mais calor solar não significa obrigatoriamente um planeta mais quente. Factores endógenos (específicos do planeta) podem mesmo fazer com que o clima se torne mais frio, ou o inverso. É a esses factores inerentes à Terra, mas que podem ter profundas implicações climáticas, nomeadamente os de índole geológica, que dedicaremos a próxima parte deste trabalho.

Referências

Abe, Yutaka (1993) - Physical state of the very early Earth. *Lithos*, 30:223-235

Abu-Lughod, Janet L. (1989) - Before European Hegemony: The World System A.D. 1250-1350. 464p., Oxford University Press, U.S.A. pages ISBN: 9780195058864

Adhémar, J. (1842) - Révolutions de la Mer. 183p., Carilian Goeury et V. Dalmont, Paris.

Adhikari, Surendra; Ivins, Erik R. (2016) - Climate-driven polar motion: 2003–2015. *Science Advances,* 2(4):e1501693 (10p.). DOI: 10.1126/sciadv.1501693

Agassiz, M.L. (1837-1838) - Upon Glaciers, and Erratic Blocks; being the Address delivered at the opening of the Helvetic Natural History Society, at Neuchatel, on the 24th of July 1837, by its President. *The Edinburgh New Philosophical Journal*, 24: 364-383.

Airapetian, V.S.; Glocer, A.;Gronoff, G.; Hébrard, E.; Danchi, W. (2016) - Prebiotic chemistry and atmospheric warming of early Earth by an active young Sun. *Nature Geoscience,* 9:452–455. DOI: 10.1038/ngeo2719

Akanuma, H. (2005) - The significance of the composition of excavated iron fragments taken from Stratum III at the site of Kaman-Kalehöyük, Turkey. *Anatolian Archaeological Studies,* 14:147–158.

Alcoforado, Maria-João; Nunes, M.F.; Garcia, J.C.; Taborda, J.P. (2000) - Temperature and precipitation reconstruction in southern Portugal during the late Mauder Minimum (AD 1675-1715). *The Holocene*, 10(3):333-340. doi: 10.1191/095968300674442959

Alley, R.B. (2000) - The Younger Dryas cold interval as viewed from central Greenland. *Quaternary Science Reviews*, 19(1-5):213-226. DOI: 10.1016/S0277-3791(99)00062-1

Alvarez, Luis W.; Alvarez, Walter; Frank Asaro, Frank; Michel, Helen V. (1980) - Extraterrestrial Cause for the Cretaceous-Tertiary Extinction. *Science*, 208(4448):1095-1108. doi: 10.1126/science.208.4448.1095

Arnold, J. R.; Libby, W. F. (1949) - Age Determinations by Radiocarbon Content: Checks with Samples of Known Age. *Science,* **110**(2869):678–680. doi:10.1126/science.110.2869.678.

Arrhenius, Svante (1896) - On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. *Philosophical Magazine and Journal of Science*, Series 5, 41(251):237-276. Doi: 10.1080/14786449608620846

Astapovich, Igor S. (1933) - New data about the fall of the great meteorite on June 30, 1908, in Central Siberia. *Astronomicheskii Zhurnal*, 10(4), 465-486.

Bahcall, J.N.; Pinsonneault, M.H.; Basu, S. (2001) - Solar Models: Current Epoch and Time Dependences, Neutrinos, and Helioseismological Properties, *Astrophysical Journal*, 555:990–1012. DOI: 10.1086/321493.

Baird, Christopher S. (2013) - When do the planets in our solar system all line up? *In: Science Questions with Suprising Answers* web site. http://sciencequestionswithsurprisinganswers.org/faqs/

Baker, Andy; Hellstrom, J.C.; Kelly, B.F.J.; Mariethoz, G.; Trouet, V. (2015) - A composite annual-resolution stalagmite record of North Atlantic climate over the last three millennia. *Scientific Reports,* 5:Art.10307 (8p.). doi:10.1038/srep10307

Baldwin, Mark P.; Dunkerto, Timothy J. (1000) - Propagation of the Arctic Oscillation from the stratosphere to the troposphere. *Journal of Geophysical Research*, 104(D24):30 937 – 30 946. DOI: 10.1029/1999JD900445

Barnes, W. C. (1910) - The Cañon Diablo Meteor. The Story of "Coon Mountain" and A Meteor That Went Astray. The Pacific Monthly, 23(4):347-356, Portland, Oregon, U.S.A.

Barras, V.; Greub, G. (2014) - History of biological warfare and bioterrorism. *Clinical Microbiology and Infection*, 20(6):497-502. doi: 10.1111/1469-0691.12706.

Barringer, Daniel M. (1905) - Coon Mountain and its crater. *Proceedings of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia*, 57:861-886.

Barringer, Daniel M. (1914) - Further notes on Meteor Crater, Arizona. *American Journal of Science*, 39:482-483.

Barringer, Daniel M. (1924) Further notes on Meteor crater in northern central Arizona (No. 2). *Proceedings Academy of Natural Sciences of Philadelphia*, 76:275-278.

Barringer, J. Paul (1993) - Acceptance Speech (Meteoritical Society Special Award Address). *Meteoritics*, 28(1):9–11. doi: 10.1111/j.1945-5100.1993.tb00242.x

Baxter, John; Atkins, Thomas (1976) - The Fire Came by: The Riddle of the Great Siberian Explosion. 165p., Doubleday, New York. ISBN: 978-0385113960.

Berger, André L. (1978a) Long-term variations of daily insolation and Quaternary climatic changes. *Journal of Atmospheric Sciences*, 35(12):2362–2367. DOI: 10.1175/1520-0469(1978)035<2362:LTVODI>2.0.CO;2

Berger, André L. (1978b) - Long-term variations of caloric insolation resulting from the earth's orbital elements. *Quaternary Research*, 9(2):139–167. doi:10.1016/0033-5894(78)90064-9

Berger, André (2012) - A Brief History of the Astronomical Theories of Paleoclimates. *In:* André Berger, Fedor Mesinger, Djordje Sijacki, *Climate Change: Inferences from Paleoclimate and Regional Aspects*, Springer Science & Business Media ISBN: 978-3709109731

Berger, A.; Li, X.S.; Loutre, M.F. (1999) - Modelling northern hemisphere ice volume over the last 3 Ma. *Quaternary Science Reviews*, 18(1):1-11. doi:10.1016/S0277-3791(98)00033-X

Berger, A.; Loutre, M.F. (1991) - Insolation values for the climate of the last 10 million years. *Quaternary Science Reviews*, 10(4):297-317. doi: 0.1016/0277-3791(91)90033-Q

Berger, A.; Tricot, Chr. (2012) - Global Climatic Changes and Astronomical Theory of Paleoclimates. In: Anny Cazenave (ed.), *Earth Rotation: Solved and Unsolved Problems*, pp111-129, D. Reidel Publish. Co., Dordrecht, Holland. ISBN: 978-9400947504

Beyrich, Heinrich Ernst (1864) - Über die Stellung der hessischen Tertiärbildungen. In: *Verhandlungen der Preussischen Akademie der Wissenschaften*, pp.640–666.

Board on Atmospheric Sciences and Climate (2006) - Marine, Lake, and Cave Proxies. *In:* Board on Atmospheric Sciences and Climate (ed.), *Surface Temperature Reconstructions for the Last 2,000 Years*, pp.53-64, National Academy of Sciences Press, Washington, DC, U.S.A. ISBN: 978-0309661447

Borovička, Jiří; Spurný, P.; Brown, P.; Wiegert, P.; Kalenda, P.; Clark, D.; Shrbený, L. (2013) - The trajectory, structure and origin of the Chelyabinsk asteroidal impactor. *Nature* 503(7475):235–237. doi:10.1038/nature12671

Bowring, Samuel A. (2014) - Early Earth: Closing the gap. *Nature Geoscience* **7**(3):169–170. DOI: 10.1038/ngeo2100.

Bowring, Samuel A.; Williams, Ian S. (1999) - Priscoan (4.00±4.03 Ga) orthogneisses from northwestern Canada. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134(1):3-16. DOI: 10.1007/s004100050465.

Braudel, Fernand (2001 [1998]) - *Memórias do Mediterrâneo - Pré-História e Antiguidade*. Tradução para português de *Les Mémoires de la Méditerranée*, 396p., Terramar, Lisboa, Portugal. ISBN: ISBN: 978-9727102860.

Brauner, Bohuslav (1908) - The Recent Nocturnal Glows. *Nature,* 78(2019):221. doi: 10.1038/078221a0

Briffa, K.R.; Osborn, T.J.; Schweingruber, F.H.; Harris, I.C.; Jones, P.D.; Shiyatov, S.G.; Vaganov, E.A. (2001) - Low-frequency temperature variations from a northern tree-ring density network. *Journal of Geophysical Research - Atmospheres,* 106(D3):2929–2941. DOI: 10.1029/2000JD900617

Brown, Peter G.; Assink, J.D.; Astiz, L.; Blaauw, R.; Boslough, M.B.; Borovička, J.; Brachet, N.; Brown, D.; Campbell-Brown, M.; Ceranna, L.; Cooke, W.; Groot-Hedlin, C. de; Drob, D.P.; Edwards, W.; Evers, L.G.; Garces, M.; Gill, J.; Hedlin, M.; Kingery, A.; Laske, G.; Le Pichon, A.; Mialle, P.; Moser, D.E.; Saffer, A.; Silber, E.; Smets, P.; Spalding, R.E.; Spurny, P.; Tagliaferri, E.; Uren, D.; Weryk, R.J.; Whitaker, R.; Krzeminski, Z. (2013) - A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors. *Nature,* 503(7475):238–241. doi:10.1038/nature12741

Bryant, Edward (2005) - Natural Hazards. 312p., Cambridge University Press. ISBN: 978-0511080

Buckley, Brendan M. ; Anchukaitis, K.; Penny, D.; Fletcher, R.; Cook, E.R.; Sano, M.; Nam, L.C.; Wichienkeeo, A.; Minh, T.T.; Hong, T.M. (2010) - Climate as a contributing factor in the demise of Angkor, Cambodia. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107(15):6748–6752. doi: 10.1073/pnas.0910827107

Büntgen, U.; Myglan, V.S.; Ljungqvist, F.C.; McCormick, M.; Di Cosmo, N.; Sigl, M.; Jungclaus, J.; Wagner, S.; Krusic, P.J.; Esper, J.; Kaplan, J.O.; de Vaan, M.A.C.; Luterbacher, J.; Wacker, L.; Tegel, W.; Kirdyanov, A.V. (2016) - Cooling and societal change during the Late Antique Little Ice Age from 536 to around 660 AD. *Nature Geoscience,* 9:231–236. DOI:10.1038/ngeo2652

Burroughs, William James (2005) - *Climate Change in Prehistory. The End of the Reign of Chaos*. 356p., Cambridge University Press, Cambridge, U.K. ISBN: 978-0521824095.

Camp, Charles D.; Tung, Ka Kit (2007) - Surface warming by the solar cycle as revealed by the composite mean difference projection. Geophysical Research Letters, 34:L14703 (5p.). DOI: 10.1029/2007GL030207

Carpenter, Edward J.; Smith Jr., K. L. (1972) - Plastics on the Sargasso Sea Surface. Science, 175(4027):1240-1241. DOI: 10.1126/science.175.4027.1240

Cazenave, Anny (ed.) (2012) - *Earth Rotation: Solved and Unsolved Problems*. Volume 187 de Nato Science Series C, 330p., D. Reidel Publish. Co., Dordrecht, Holland. ISBN: 978-9400947504

Chamberlin, T.G. (1899) - An attempt to frame a working hypothesis of the cause of glacial epochs on an atmospheric basis. *The Journal of Geology,* 7(7):667-685.

Chao, E.C.T.; Shoemaker, E.M.; Madsen, B.M. (1960) - First natural occurrence of coesite. *Science,* 132(3421):220-222. doi: 10.1126/science.132.3421.220

Clausen, Henrik B.; Hammer, C.U.; Hvidberg, C.S.; Dahl-Jensen, D.; Steffensen, J.P.; Kipfstuhl, J.; Legrand, M. (1997) - Comparison of the volcanic records over the past 4000 years from the Greenland Ice Core Project and Dye 3 Greenland ice cores. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 102(C12):26707–26723. doi: 10.1029/97JC00587

Clerke, Agnes M. (1894) - A prolonged sunspot minimum. Letter to the Editor of Knowledge. *Knowledge - A Monthly Record of Science*, 17:206-207.

Cloud, Preston (1972) - A working model of the primitive Earth. *American Journal of Science*, 272(6):537-548. DOI: 10.2475/ajs.272.6.537

Cowan, Clyde; Atluri, C.R.; Libby, W.F. (1965) - Possible Anti-Matter Content of the Tunguska Meteor of 1908. *Nature,* 206(4987):861-865. doi:10.1038/206861a0

Croll, James (1864) - On the physical cause of the change of climate during geological epochs. *Philosophical Magazine*, 28(187):121-137. Doi: 10.1080/14786446408643733

Croll, James (1875 [1893]) - *Climate and time geological relations: a theory of secular changes of the earth's climate*. 2nd ed., 577p., D. Appleton and company, New York.

Cuffey, K.M.; G.D. Clow (1997) - Temperature, accumulation, and ice sheet elevation in central Greenland through the last deglacial transition. *Journal of Geophysical Research - Oceans*, 102(C12):26383-26396. DOI: 10.1029/96JC03981

Damon, P.E.; Sonnett, C.P. (1991) - Solar and terrestrial components of the atmospheric ^{14}C variation spectrum. *In* C. P. Sonnett, M. S. Giampapa & M. S. Matthews (eds.), *The sun in time*, pp.360–388, The University of Arizona Press, Tucson, AZ, U.S.A.

De Geer, Gerard (1912) - A geochronology of the last 12000 years. *Congrès Géologique International – Comptes-Rendus,* Stockholm 1910, pp.241-253,

Denning, W.F. (1908) - Genial June. *Nature,* 78(2019):221. doi: 10.1038/078221c0

der Schrier, Gerard van; Groenland, Rob (2011) - The Great Storm of 1–2 October 1697 revisited. *Weather*, 66(10):266-269. doi: 10.1002/wea.831

Dias, J. Alveirinho (2015) - *E o Azul se fez Homem. Parte I - A génese do Ambiente*. 78p., CIMA (Centro de Investigação Marinha e Ambiental), Faro Portugal. DOI: 10.13140/RG.2.1.1380.9367

Domínguez-Castro, F.; García-Herrera, R.; Ribera, P.; Barriendos, M. (2010) - A shift in the spatial pattern of Iberian droughts during the 17th century. *Climate of the Past*, 6(5):553-563. doi: 10.5194/cp-6-553-2010

Eddy, John A. (1976) - The Maunder Minimum. *Science,* 192(4245):1189–1202. DOI: 10.1126/science.192.4245.1189.

Elkibbi, Maya; Rial, José A. (2001) - An outsider's review of the astronomical theory of the climate: is the eccentricity-driven insolation the main driver of the ice ages? *Earth-Science Reviews*, 56(1-4):161–177. doi:10.1016/S0012-8252(01)00061-7

Emiliani, Cesare (1954) - Depth habitats of some species of pelagic foraminifera indicated by oxygen isotope ratios. *American Journal of Science*, 252(3):149-158. doi: 10.2475/ajs.252.3.149

Epstein, S.; Buchsbaum, R.; Lowenstam, H.A.; Urey, H.C. (1953) - Revised carbonate-water isotopic temperature scale. *Bulletin of the Geological Society of America*, 64(11):1315-1326. doi: 10.1130/0016-7606(1953)64[1315:RCITS]2.0.CO;2

Esper, J.; E.R. Cook, E.R.; and F.H. Schweingruber, F.H. (2002) -Low-Frequency Signals in Long Tree-Ring Chronologies for Reconstructing Past Temperature Variability. *Science,* **295**(5563):2250–2253. DOI:10.1126/science.1066208

Fabricius, Johannes (1611) - *De Maculis in Sole observatis et Apparente earum cum Sole Conversione Narratio, cui adjecta est de modo eductionis specierum visibilium dubitatio*. [36p.], Typis Laurentij Seuberlichij, Witebergae.

Fagan, Brian (2001) - *The Little Ice Age: How Climate Made History 1300-1850*. 272p., Basic Books, New York, U.S.A. ISBN: 978-0465022724

Farley, K.A.; Montanari, A.; Shoemaker, E.M.; Shoemaker, C.S. (1998) – Geochemical evidence for a comet shower in the late Eocene. *Science,* 280(5367):1250-1253. doi: 10.1126/science.280.5367.1250

Fesenkov, Vasily G. (1962) - On the Cometary Nature of the Tunguska Meteorite. *Soviet Astronomy*, 5(4):441-451

Fesenkov, Vasily G. (1966) - A Study of the Tunguska Meteorite Fall. *Soviet Astronomy*, 10(2):195-213.

Firestone, R.B.; West, A.; Kennett, J.P.; Becker, L.; Bunch, T.E.; Revay, Z.S.; Schultz, P.H.; Belgya, T.; Kennett, D.J.; Erlandson, J.M.; Dickenson, O.J.; Goodyear, A.C.; Harris, R.S.; Howard, G.A.; Kloosterman, J.B.; Lechler, P.; Mayewski, P.A.; Montgomery, J.; Poreda, R.; Darrah, T.; Que Hee, S.S.; Smith, A.R.; Stich, A.; Topping, W.; Wittke, J.H.; Wolbach, W.S. (2007) - Evidence for an extraterrestrial impact 12,900 years ago that contributed to the megafaunal extinctions and the Younger Dryas cooling. *PNAS - Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,* 104(41):16016–16021. doi: 10.1073/pnas.0706977104

Fix, John D. (2010 [1995]) - *Astronomy: Journey to the Cosmic Frontier*. 6th Edition, 768p., McGraw-Hill Higher Education. ISBN: 9780073512181

Folco L, Rochette, P.; Perchiazzi, N.; D'Orazio, M.; Laurenzi, M.A.; Tiepolo, M. (2008) - Microtektites from Victoria Land Transantarctic Mountains. *Geology,* 36(4):291–294. doi: 10.1130/G24528A.1

Foote, A.E. (1891) - Geological features of the meteoric locality in Arizona. *Academy of Natural Sciences Philadelphia Proceedings*, 40:407.

Foote, A.E. (1892) - A new locality for meteoric iron with a preliminary notice of discovery of diamonds in the iron. Proceedings of the American Association of Advanced Science, 40:279-283.

Fourier, Jean Baptiste (1827) - Les températures du Globe Terrestre et des Espaces Planétaires. *Mémoires de L'Académie Royale des Sciences de L'Institut de France*, VII:569-604, Paris.

Fraas E. (1919) - Begleitworte zu der geognostischen Spezialkarte von Württemberg. 31p., Atlasblatt Bopfingen. Statistisches Landesamt, Kohlhammer, Stuttgart, Germany.

Froude, D.O.; Ireland, T.R.; Kinny, P.D.; Williams, I.S.; Compston, W.; Williams, I.R.; Myers, J.S. (1983) - Ion microprobe identification of 4,100–4,200 Myr-old terrestrial zircons. *Nature,* 304(5927):616–18. DOI: 10.1038/304616a0.

Galilei, Galileu (1613) - *Istoria e Dimostrazioni Intorno Alle Macchie Solar.* 163p., Appresso Giacomo Mascardi, Roma.

Gilbert, G.K. (1896) - The origin of hypotheses, illustrated by the discussion of a topographic problem. *Science*, 3(53):1-13.

Giuli, Gabriele; Cicconi, M.R.; Eeckhout, S.G.; Pratesi, G.; Paris, E.; Folco, L. (2014) - Australasian microtektites from Antarctica: XAS determination of the Fe oxidation state. *Meteoritics & Planetary Science*, 49(4):696-705. doi: 10.1111/maps.12283

Gleissberg, Wolfgang (1944) - A table of secular variations of the solar cycle. *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*, 49(4):243–244. DOI: 10.1029/TE049i004p00243

Gleissberg, Wolfgang (1944) - Correspondence to the Editors of The Observatory. Evidence for a Long Solar Cycle. *The Observatory,* 65(282):123-125.

Gleissberg, Wolfgang (1958) - The eighty-year sunspot cycle. *Journal of the British Astronomical Association*, 68:148–152.

Gleissberg, Wolfgang (1966) - Ascent and descent in the eighty-year cycles of solar activity. *Journal of the British Astronomical Society,* 76:265—270.

Gou, XiaoHua; Deng, Y.; Chen, F-H.; Yang, M-X.; Fang, K-Y.; Gao, L.-L.; Zhang, F. (2010) - Tree ring based streamflow reconstruction for the Upper Yellow River over the past 1234 years. *Chinese Science Bulletin*, 55(36):4179-4186. doi: 10.1007/s11434-010-4215-z

Grattan, John; Rabartin, R.; Self, S.; Thordarson, T. (2005) - Volcanic air pollution and mortality in France 1783–1784 / Pollution atmosphérique volcanique et mortalité en France de 1783–1784. Comptes Rendus Géoscience, 337(7):641-651. doi: 10.1016/j.crte.2005.01.013

Halliday, Alex N. (2000) - Terrestrial accretion rates and the origin of the Moon. *Earth and Planetary Science Letters,* 176(1):17–30. DOI: 10.1016/S0012-821X(99)00317-9.

Hammer, C.U.; Clausen, H.B.; Dansgaard, W. (1980) - Greenland ice sheet evidence of post-glacial volcanism and its climatic impact. *Nature* 288(5788):230-235. doi:10.1038/288230a0

Hays, J.D.; Imbrie, J.; Shackleton, N.J. (1976) - Variations in the Earth's Orbit: Pacemaker of the Ice Ages. *Science*, 194(4270):1121-1132. DOI: 10.1126/science.194.4270.1121

Hegerl, G.C.; Crowley, T.J.; Hyde, Frame, D.J. (2006) - Climate sensitivity constrained by temperature reconstructions over the past seven centuries. *Nature,* 440(7087):1029-1032. DOI: 10.1038/nature04679

Heidelberg University (2016) - Multiple Cosmic Impacts 790,000 Years Ago. *In:* website da Universidade de Heidelberg, Press Release No. 25/2016. Photo: Institut für Geowissenschaften, Universität Heidelberg.

Hildebrand, Alan R.; Penfield, Glen T.; Kring, David A.; Pilkington, Mark; Camargo, Antonio; Jacobsen, Stein B.; Boynton, William V. (1991) - Chicxulub Crater: A possible Cretaceous/Tertiary boundary impact crater on the Yucatán Peninsula, Mexico. *Geology*, 19(9):867-871. doi: dx.doi.org/10.1130/0091-7613(1991)019<0867:CCAPCT>2.3.CO;2

Hoyt, William Graves (1987) - Coon Mountain Controversies. *Meteor Crater and the Development of Impact Theory*. 443p., University of Arizona Press, Tucson, AZ, U.S.A. ISBN: 978-0816509683

Huang, S. (2004) - Merging Information from Different Resources for New Insights into Climate Change in the Past and Future. *Geophysical Research Letters,* 31:L13205. DOI: 10.1029/2004GL019781

Hunt, J. N., Palmer, R.; Penney, (1960) - Atmospheric Waves Caused by Large Explosions. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences,* 252(1011):275-315. doi:10.1098/rsta.1960.0007

Iizuka, Y.; Horie. K.; Komiya, T.; Maruyama, S.; Hirata, T.; Hidaka, H.; Windley, B.F. (2006) - 4.2 Ga zircon xenocryst in an Acasta gneiss from northwestern Canada: Evidence for early continental crust. *Geology*, 34(4):245-248. DOI: 10.1130/G22124.1

IPCC (2001) - Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 881p., Cambridge University Press, Cambridge, U.K. ISBN: 0521014956.

IPCC (2013) - Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom / New York, NY, USA. ISBN: 978-1107661820

Jackson IV, A.A.; Ryan, M.P. (1973) – Was the Tungus Event due to a Black Hole? *Nature,* 245(5420):88-89. doi: 10.1038/245088a0

Jones, Matthew D.; Roberts, C.N.; Leng, M.J.; Türkeş, M. (2006) – A high-resolution late Holocene lake isotope record from Turkey and links to North Atlantic and monsoon climate. *Geology,* 34(5):361-364. doi: 10.1130/G22407.1

Jones, P.D.; Briffa, K.R.; Barnett, T.P.; Tett, S.F.B (1998) - High-resolution Palaeoclimatic Records for the last Millennium: Interpretation, Integration and Comparison with General Circulation Model Control-run Temperatures. The Holocene, 8:55–471. DOI: 10.1191/095968398667194956

Jones, P.D.; Mann, M.E. (2004) - Climate Over Past Millennia. Reviews of Geophysics, 42:RG2002. DOI: 10.1029/2003RG000143

Kant, Immanuel (1755 [2009]) - *Universal Natural History and Theory of the Heavens or An Essay on the Constitution and the Mechanical Origin of the Entire Structure of the Universe Based on Newtonian Principles* [Tradução por Ian C. Johnston de Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels oder Versuch von der Verfassung und dem mechanischen Ursprunge des ganzen Weltgebäudes nach Newtonischen Grundsätzen abgehandelt, Johann Friedrich Petersen, Königsberg und Leipzig, 1755]. 162p., Richer Resources Publications, Arlington, Virginia, VA, U.S.A. ISBN: 978-1935238911.

Kant, Immanuel (1784) - Beantwortung der Frage: Was ist Aufklärung. *Berlinische Monatsschrift,* 481-494, Berlin, Germany. Tradução para português, por Artur Morão, com o título *Resposta à pergunta: "O que é o Iluminismo?"*, disponível on-line em www.lusosofia.net

Kasting, James F. (1993) - Earth's Early Atmosphere. *Science*, 259(5097): 920–26. DOI: 10.1126/science.11536547

Kasting, James F.; Ackerman, Thomas P. (1986) - Climatic consequences of very high carbon dioxide levels in the earth's early atmosphere. Science, 234(4782):1383-1385. DOI: 10.1126/science.11539665

Kasting, James F.; Pollack, James B.; Crisp, David (1984) - Effects of High CO2 Levels on Surface Temperature and Atmospheric Oxidation State of the Early Earth. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 1(4):403–428. DOI: 10.1007/BF00053803

Kasting, James F.; Siefert, Janet L. (2002) - Life and the Evolution of Earth's Atmosphere. *Science*, 296(5570):1066-1068. DOI: 10.1126/science.1071184

Kepler, Johannes (1596) - *Prodromus dissertationum cosmographicarum continens mysterium cosmographicum, de admirabili proportione orbium coelestium, de que causis coelorum numeri, magnitudinis, motuumâque periodicorum genuinis & proprijs: demonstratum, per quinque regularia corpora geometrica*. 181p., G. Gruppenbachius, Tübingen.

Kepler, Johannes (1609) - *Astronomia Nova Aitiologētos, Sev Physica Coelestis, tradita commentariis De Motibvs Stellae Martis, Ex observationibus G. V. Tychonis Brahe*. 337p., Voegelin, Heidelberg.

Kington, John (1999) - The severe winter of 1697/8. *Weather* 54(2):43–49. doi: 10.1002/j.1477-8696.1999.tb06422.x

Kinzie, Charles R.; Que Hee, S.S.; Stich, A.; Tague, K.A.; Mercer, C.; Razink, J.; Kennett, D.J.; DeCarli, P.S.; Bunch, E.; Wittke, J.H.; Israde-Alcántara, I.; Bischoff, J.L.; Goodyear, A.C.; Tankersley, K.B.; Kimbel, D.R.; Culleton, B.J.; Erlandson, M.; Stafford, T.W.; Kloosterman, J.B.; Moore, A.M.T.; Firestone, R.B.; Tortosa, E.A.; Pardo, F.J.; West, A.; Kennett, J.P.; Wolbach, W.S. (2014) - Nanodiamond-Rich Layer across Three Continents Consistent with Major Cosmic Impact at 12,800 Cal BP. *The Journal of Geology*, 122(5):475-506. doi: 10.1086/677046

Kring, David A. (2007) - *Guidebook to the Geology of Barringer Meteorite Crater, Arizona (aka Meteor Crater)*. 150p., 70th Annual Meeting of the Meteoritical Society, Tucson, Arizona, U.S.A.

Kuhn, W.R.; Atreya, S.K. (1979) - Ammonia photolysis and the greenhouse effect in the primordial atmosphere of the earth. *Icarus*, 37(1):207-213. DOI: 10.1016/0019-1035(79)90126-X

Kuhn, W.R.; Kasting, J.F. (1983) - Effects of Increased CO2 Concentrations on Surface Temperature of the Early Earth. *Nature*, 301(5895):53–55, DOI: 10.1038/301053a0

Kulik, Leonid (1927/1935) - On the Fall of the Podkamennaya Tunguska Meteorite in 1908. Publicado originalmente em russo no *Journal of the Russian Academy of Sciences*, 1927A:399–402, e traduzido para inglês por Lincoln La Paz e

Gerhardt Wiens, publicado em 1935 em *Meteoritics & Planetary Science*, 1(1):35-39. doi: 10.1111/j.1945-5100.1935.tb00263.x

Lamb, H.F.; Gasset, F.; Benkaddour, A.; El Hamouti, E.; van der Kaars, S.; Perkins, W.T.; Pearce, N.J.; Roberts, C.N. (1995) - Relation between century-scale Holocene arid intervals in tropical and temperate zones. Nature, 373(6510):134 - 137. DOI: 10.1038/373134a0

Lamb, Hubert H. (1970) - Volcanic Dust in the Atmosphere; with a Chronology and Assessment of Its Meteorological Significance. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences,* 266(1178):425-533,

Lamb, Hubert H. (1972) – Climate: Present, Past and Future. Vol. 1 – Fundamentals and Climate Now.. 613p., Methuen & Co., London, U.K. ISBN: 978-0416115307

Lamb, Hubert H. (1977) – Climate: Present, Past and Future. Vol. 2 – Climate History and the Future. 835p., Methuen & Co., London, U.K. ISBN: 0064738817

Lamb, Hubert H. (1991) - Historic storms of the north sea, British Isles and Northwest Europe. 204p., Cambridge University Press, Cambridge, U.K.

Lamb, Hubert H. (1995) - Climate, History and the Modern World. 2º ed., 433p., Routledge, London , UK / New York, NY, U.S.A. ISBN: 0415127343

Laplace, Pierre Simon (1796 [1798]) - *Exposition du systeme du monde*. Seconde édition. 351p., J.B.M. Duprat, Paris.

Laskar, J.; Joutel, F.; Robutel, P. (1993) - Stabilization of the Earth's obliquity by the Moon. *Nature*, 361(6413):615-617. DOI: 10.1038/361615a0

Lee, Keenan (2004) - Popigai Impact Structure. In: web page de Keenan Lee no web site inside.mines.edu da Colorado School of Mines, Golden, CO, U.S.A.

Lerman, Abraham (2008) - Carbon Cycle. *In*: Gornitz, Vivien (ed.), *Encyclopedia of Paleoclimatology and Ancient Environments*, pp. 107-117, Springer, Dordrecht, The Netherlands. ISBN: 9781402045516

Lindgrén, S.; Neumann, S.J. (1981) - The cold and wet year 1695 — a contemporary German account. *Climatic Change*, 3(2):173-187. doi: 10.1007/BF00154435

Lisiecki, Lorraine E.; Raymo, Maureen E. (2005) - A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $d^{18}O$ records. *Paleoceanography*, 20:PA1003 (17p.). doi: 10.1029/2004PA001071, 2005

Liu, Zhonghui; Pagani, M.; Zinniker, D.; DeConto, R.; Huber, M.; Brinkhuis, H.; Shah, S.R.; Leckie, R.M.; Pearson, A. (2009) - Global Cooling During the Eocene-Oligocene Climate Transition. *Science* 323(5918):1187-1190. doi: 10.1126/science.1166368

Luterbacher, Jürg; Rickli, R,; Xoplaki, E.; Tinguely, C.; Beck, C.; Pfister, C.; Wanner, H. (2001) - The Late Maunder Minimum (1675–1715) – A Key Period forStudying Decadal Scale Climatic Change in Europe. *Climatic Change*, 49(4):441-462. doi: 10.1023/A:1010667524422

Luterbacher, Jürg; Werner, J.P.; Smerdon, J.E.; Fernández-Donado, L.; González-Rouco, F.J.; Barriopedro, D.; Ljungqvist, F.C.; Büntgen, U.; Zorita, E.; 8, S Wagner, S. (2016) – European summer temperatures since Roman times. *Environmental Research Letters*, 11(2):art.024001 (12p.). doi: 10.1088/1748-9326/11/2/024001

Lyell, Charles (1830) - *Principles of Geology: being an attempt to explain the former changes of the Earth's surface, by reference to causes now in operation*. 1st ed., vol. I, 511p.; vol. II, 330p. John Murray, London.

Lyell, Charles (1833) - *Principles of geology, being an attempt to explain the former changes of the Earth's surface, by reference to causes now in operation*. 1st ed., Volume 3, John Murray, London.

Lyell, Charles (1872) - *Principles of Geology: being an attempt to explain the former changes of the Earth's surface, by reference to causes now in operation*. 11th ed., 652p., John Murray, London.

Madsen, Jakob; Yan, Eric (2013) - The First Great Divergence and the Evolution of Cross-Country Income Inequality during the Last Millennium: the Role of Institutions and Culture. Applied Economics, 45(33):4641-4650. doi: 10.1080/00036846.2013.795283

Mann, M.E.; Bradley, R.S.; Hughes, M.K. (1999) - Northern Hemisphere Temperatures During the Past Millennium: Inferences, Uncertainties, and Limitations. Geophysical Research Letters, **26**(6):759–762.

Mann, M.E.; Jones, P.D. (2003) - Global Surface Temperatures over the Past Two Millennia. Geophysical Research Letters, 30(15):1820. DOI: 10.1029/2003GL017814

Marchi, Luigi de (1895) - Le cause dell'era glaciale: ricerca teorica delle condizioni che determinano l'attuale distribuzione delle temperature e delle pioggie sulla superficie terrestre e che possono averla modificata nei precedenti periodi geologici. 231p., Premiata Tipografia Fratelli, Pavia

Marques, José (2002) – Estados do tempo e outros fenómenos, na região de Braga, no século XVIII. *Bracara Augusta - Revista Cultural da Câmara Municipal de Braga*, 50:97–194, Braga.

Masaitis, Victor L. (1998) - Popigai crater: Origin and distribution of diamond-bearing impactites. *Meteoritics and Planetary Science*, 33(2):349–359. doi: 10.1111/j.1945-5100.1998.tb01639.x

Masaitis, Victor L., Mikhailov, M.V.; Selivanovskaya T.V. (1972) - Popigai Basin - an explosion meteorite crater. *Meteoritics*, 7(1):39-46. Translated by Tatiana K. Bodine from *Doklady Akademii Nauk SSSR*, Volume 197, No. 6, 1971

Matthes, François E. (1934) - Report of the committee on glaciers, 1933–34. *EOS - Transactions of the American Geophysical Union,* 15(2):279–285. doi: 10.1029/TR015i002p00279

Matthes, François E. (1939) - Report of Committee on Glaciers, April 1939. *EOS - Transactions of the American Geophysical Union,* 20(4):518–523. doi: 10.1029/TR020i004p00518.

Matthes, François E. (1940) - Committee on Glaciers, 1939--40. *EOS - Transactions of the American Geophysical Union,* 21(2): 396-406.

Maunder, E. Walter (1894) - A prolonged sunspot minimum," *Knowledge - A Monthly Record of Science*, 17:173-176.

Milankovitch, M.M. (1920) - Theorie Mathématique des PhenomenesThermiques Produits par la Radiation Solaire. 338p., Academie Yougoslave des Sciences et des Arts de Zagreb, Gauthier-Villars et Cie.

Milankovitch, M.M. (1941 [1969]) - *Kanon der Erdbestrahlung und seine Andwendung auf das Eiszeiten-problem*. Royal Serbian Academy, Belgrade. Traduzido para inglês com o título *Canon of insolation and the ice-age problem,* 484p., pelo Israel Program for Scientific Translations, Jerusalém.

Mithen, Steven (2004) - After the ice: a global human history, 20,000 to 5,000 BC. 664p., Harvard University Press, Cambridge, MA, U.S.A. ISBN: 0674015703.

Moberg, A.; Sonechkin, D.M.; Holmgren, K.; Datsenko, N.M.; Karlén, W. (2005) - Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low- and high-resolution proxy data. Nature, 443:613–617. DOI: 10.1038/nature03265

Moberg, A.;. Sonechkin, D.M; Holmgren, K.; Datsenko, N.M.; Karlén, W (2005) - Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low- and high-resolution proxy data. Nature, **443**:613–617. DOI: 10.1038/nature03265

Moreda, Vicente Pérez (1988) - Demografía Histórica en España. 608p., Ediciones El Arquero, Madrid. ISBN: 9788486902032

Morellón, Mario; Valero-Garcés, B.; González-Sampériz, P.; Vegas-Vilarrúbia, T.; Rubio, E.; Rieradevall, M.; Delgado-Huertas, A.; Mata, P.; Romero, O.; Engstrom, D.R.; López-Vicente, M.; Navas, A.; Soto, J. (2011) - Climate changes and human activities recorded in the sediments of Lake Estanya (NE Spain) during the Medieval Warm Period and Little Ice Age. *Journal of Paleolimnology*, 46(3):423-452. Doi: 10.1007/s10933-009-9346-3

Muller, Richard A.; MacDonald, Gordon J. (1997) - Glacial Cycles and Astronomical Forcing, *Science,* 277(5323):215-218. DOI: 10.1126/science.277.5323.215

National Solar Observatory (1999) - Planetary Alignments. *In: National Solar Observatory at Sacramento Peak* web site.

Newton, Isaac (1687) - *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. 522p., Jussu Societatis Regiae ac Typis Josephi Streater. Prostat apud plures bibliopolas, Londres.

O'Keefe, John D.; & Ahrens, Thomas J (1989) - Impact production of $C0_2$ by the Cretaceous/Tertiary extinction bolide and the resultant heating of the Earth. *Nature,* 338(6212):247 – 249. doi:10.1038/338247a0

O'Neil, Jonathan; Carlson, R.W.; Francis, D.; Stevenson, R.K. (2008) - Neodymium-142 Evidence for Hadean Mafic Crust. Science, 321(5897):1828-1831. DOI: 10.1126/science.1161925

Oerlemans, J.H. (2005) - Extracting a Climate Signal from 169 Glacier Records. Science, **308**:675–677. DOI: 10.1126/science.1107046

Oort, Jan H. (1950) - The structure of the cloud of comets surrounding the Solar System and a hypothesis concerning its origin. *Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands*, 11:91-110.

Öpik, Ernst Julius (1932) - Note on Stellar Perturbations of Nearby Parabolic Orbits. *Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences*, **67**(6):169–182. doi: 10.2307/20022899.

Ortega, P.; Lehner, F.; Swingedouw, D.; Masson-Delmotte, V.; Raible, C.C.; Casado, M.; Yiou, P. (2015) - A model-tested North Atlantic Oscillation reconstruction for the past millennium. Nature, 523(7558):71-74. DOI: 10.1038/nature14518

Owen, T.; Cess, R.D.; Ramanathan, V. (1979) - Enhanced CO_2 greenhouse to compensate for reduced solar luminosity on early Earth. *Nature*, 277(5698):640-642. DOI: 10.1038/277640a0.

Patterson, William P.; Dietrich, K.A.; Holmden, C.; Andrews, J.T. (2010) - Two millennia of North Atlantic seasonality and implications for Norse colonies. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107(12):5306–5310. doi: 10.1073/pnas.090252210

Peixoto, J. (1989) - O que é o Clima: Quid est Clima? Revista Colóquio/Ciências, 6:17-30, Lisboa, Portugal.

Petaev, Michail I.; Huang, S.; Jacobsen, S.B.; Zindler, A. (2013) - Large Pt anomaly in the Greenland ice core points to a cataclysm at the onset of Younger Dryas. *PNAS - Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,* 110(32):12917–12920. doi: 10.1073/pnas.1303924110

Petersen, Sierra V.; Dutton, Andrea; Lohmann, Kyger C. (2016) - End-Cretaceous extinction in Antarctica linked to both Deccan volcanism and meteorite impact via climate change. *Nature Communications,* 7:art.12079 (9p.). doi: 10.1038/ncomms12079

Poag, C. Wylie; Koeberl, C.; Reimold, W.U, (2004) - The Chesapeake Bay Crater. Geology and Geophysics of a Late Eocene Submarine Impact Structure. 522p., Springer-Verlag Berlin Heidelberg. ISBN: 978-3642189005 (Online)

Poag, C. Wylie; Powars, D.S.; Poppe, L.J.; Mixon, R.B. (1994) - Meteoroid mayhem in Ole Virginny: Source of the North American tektite strewn field. *Geology*, 22(8):691-694. doi: 10.1130/0091-7613(1994)022<0691:MMIOVS> 2.3.CO;2

Poag, C. Wylie; Powars, D.S.; Poppe, L.J.; Mixon, R.B. (1994) - Meteoroid mayhem in Ole Virginny: Source of the North American tektite strewn field. *Geology* 22, 691–694 (1994).

Pomeranz, Kenneth (2000) - The Great Divergence: China, Europe, and the Making of the Modern World Economy. 382p., Princeton University Press, Princeton, NJ, U.S.A. ISBN: 978-0691005430.

Pouillet, Claude (1838) - Mémoire sur la chaleur solaire, sur les pouvoirs rayonnants et absorbants de l'air atmosphérique et sur la température de l'espace. Comptes Rendus Hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences, 7:24-65, Paris.

Prasad, M. Shyam; Roy, S.K.; Gupta, A. (2010) - Changes in abundance and nature of microimpact craters on the surfaces of Australasian microtektites with distance from the proposed source crater location. *Meteoritics & Planetary Science*, 45(6):990-1006. doi: 10.1111/j.1945-5100.2010.01066.x

Rehren, T.; Belgya, T.; Jambon, A.; Káli, G.; Kasztovszky, Z.; Kis, Z.; Kovács, I.; Maróti, B.; Martinón-Torres, M.; Miniaci, G.; Pigott, V.C.; Radivojević, M.; Rosta, l.; Szentmiklósi, L.; Szőkefalvi-Nagy, Z. (2013) - 5,000 years old Egyptian iron beads made from hammered meteoritic iron. Journal of Archaeological Science, 40(12):4785–4792. DOI: 10.1016/j.jas.2013.06.002

Richards, Mark A. ;Alvarez, W.; Self, S.; Karlstrom, L.; Renne, P.R.; Manga, M.; Sprain, C.J.; Smit, J.; Vanderkluysen, V.; Gibson, S.A. (2015) - Triggering of the largest Deccan eruptions by the Chicxulub impact. *Geological Society of America Bulletin*, 127(11-12):1507. doi: 10.1130/B31167.1, v.

Rochette, P.; Folco, L.; Suavet, C.; van Ginneken, M.; Gattacceca, J.; Perchiazzi, N.; Braucher, R.; Harvey, R.P. (2008) - Micrometeorites from the Transantarctic Mountains. *PNAS - Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105(47):18206-18211. doi: 10.1073/pnas.0806049105

Rosing, Minik T.; Bird, D.K.; Sleep, N.H.; Bjerrum, C.J. (2010) - No climate paradox under the faint early Sun. Nature, 464(7289):744-747. DOI: 10.1038/nature08955

Ross, Hugh (2011) - Resolving Faint Sun Paradoxes. *In:* web site RTB – Reasons To Believe.

Ruben, S.; Kamen, M. D. (1941) - Long-Lived Radioactive Carbon: C^{14}. *Physical Review* **59** (4): 349–354, doi:10.1103/PhysRev.59.349

Ruddiman, W.F.; McIntyre, A. (1979) - Warmth of the subpolar North Atlantic ocean during Northern Hemisphere ice sheet growth. *Science*, 204(4389):173–175. Doi: 10.1126/science.204.4389.173

Sackmann, I.-Juliana; Boothroyd, Arnold I. (2003) - Our Sun. V. A Bright Young Sun Consistent with Helioseismology and Warm Temperatures on Ancient Earth and Mars. *The Astrophysical Journal*, 583:1024–1039

Sagan, Carl (1994 [1997]) - *Pale Blue Dot: A Vision of the Human Future in Space*. 429p., Random House. ISBN: 9780679438410

Sagan, Carl; Mullen, George (1972) - Earth and Mars: Evolution of Atmospheres and Surface Temperatures. *Science*, 177(4043:52-56. DOI: 10.1126/science.177.4043.52

Schneider, David A.; Kent, Dennis V.; Mello, Gilberto A. (1992) - A detailed chronology of the Australasian impact event, the Brunhes-Matuyama geomagnetic polarity reversal, and global climate change. *Earth and Planetary Science Letters*, 111(2-4):395-405. doi:10.1016/0012-821X(92)90192-X

Schwabe, Samuel Heinrich (1843) - Sonnenbeobachtungen im Jahre 1843. *Astronomische Nachrichten*, 21:233-236.

Sederholm, Jakob Johannes (1907) - Om granit och gneis, deras uppkomst, uppträdande och utbredning inom urberget i Fennoskandia [On granite and gneiss, their origin, relations and occurrence in the Pre-Cambrian complex of Fenno-Scandia]. 110p., Bulletin de la Commission Géologique de Finlande, 23, Helsingfors [Helsínquia].

Shackleton, Nicholas J.; Berger, A.; Peltier, W.R. (1990) - An alternative astronomical calibration of the lower Pleistocene timescale based on ODP site 677. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 81(4):251–261. Doi: 10.1017/S0263593300020782

Shackleton, Nicholas J.; Opdyke, Neil D. (1973) - Oxygen isotope and palaeomagnetic stratigraphy of Equatorial Pacific core V28-238: Oxygen isotope temperatures and ice volumes on a 10^5 year and 10^6 year scale. *Quaternary Research*, 3(1):39–55. doi: 10.1016/0033-5894(73)90052-5

Shoemaker, Eugene M. (1959) - Impact mechanics at Meteor Crater, Arizona. 55p., Open-File Report 59-108, prepared on behalf of the U. S. Atomic Energy Commission, U.S. Geological Survey, Menlo Park, CA, U.S.A.

Shoemaker, Eugene M. (1987) - Meteor Crater, Arizona. *In:* Stanley S. Beus (ed.), *Geological Society of America Centennial Field Guide - Rocky Mountain Section*, pp.399-404. ISBN: 0-8137-5402-X.

Shoemaker, Eugene M.; Kieffer, Susan W. (1974) - *Guidebook to the Geology of Meteor Crater, Arizona*. 66p., Center for Meteorite Studies, Arizona State University, Tempe, AZ, U.S.A.

Singer, S. F.; Avery, D. T. (2007) - Unstoppable Global Warming: Every 1,500 Years. 260p., Rowman & Littlefield Publ., Blue Ridge Summit, PA, U.S.A. ISBN: 978-0742551176

Spiegel, E. A,: Zahn, J.-P. (1992) - The solar tachocline. *Astronomy & Astrophysics*, 265:106-114

Spörer, Gustav (1889) - Sur les Differérences que Présentent l'Hémisphère Nord et l'Hémisphère Sud du Soleil. *Bulletin Astronomique*, 6:60-63.

Spörer, Gustav (1889) - Über die Periodicität der Sonnenflecken seit dem Jahre 1618, vornehmlich in Bezug auf die heliographische Breite derselben, und Hinweis auf eine erhebliche Störung dieser Periodicität während eines langen Zeitraumes. *Nova Acta der Kaiserlich Leopoldinisch-Carolinische Deutsche Akademie der Naturforscher*, 53(2):283-324.

Stehlin, H.G. (1910) - Remarques sur les faunules de Mammifères des couches éocènes et oligocènes du Bassin de Paris. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 4ème série, 9:488-520

Steinthorsson, S. (1992) - Annus mirabilis: 1783 í erlendum heimildum (Annus mirabilis: the year 1783 according to contemporary accounts outside of Iceland), Skírnir, 166:133–159.

Stevens, Catharine O. (1908) - A Long-lived Solar Halo. *Nature,* 78(2019):221. doi: 10.1038/078221b0

Stothers, Richard B. (1984) - The great Tambora eruption in 1815 and its aftermath. *Science*, 224(4654):1191-1198. doi: 10.1126/science.224.4654.1191.

Taylor, S. Ross; McLennan, Scott M. (1996) - The Evolution of Continental Crust. Scientific American, 274(1):76-81.

Teofrasto (c.300 a.C. [1916]) - Enquiry into plants and minor works on odours and weather signs. [English translation by Sir Arthur Hort]. Vol. II, 524p., W. Heinemann, London / G.P. Putnam's Sons, New York.

Thordarson, Thorvaldur; Self, Stephen (2003) - Atmospheric and environmental effects of the 1783–1784 Laki eruption: A review and reassessment. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 108(D1):AAC 7-1–AAC 7-29. doi: 10.1029/2001JD002042

Tilghman, Benjamin C. (1905), Coon Butte, Arizona, *Proceedings of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia,* 57:887-914.

Tocqueville, Alexis de (1856) - *L'Ancien Régime et la Révolution.* 456p., Michel Lévi Frères, Paris

Trigo, Ricardo M.; Vaquero, J.M.; Alcoforado, M.J.; Barriendos, M.; Taborda, J.; García-Herrera, R.; Luterbacher, J. (2008) - Iberia in 1816, the year without a summer. *International Journal of Climatology*, 29(1):99-115. doi: 10.1002/joc.1693.

Tyndall, John (1861) - On the Absorption and Radiation of IHeat by Gases and Vapours,and on the Physical Connexion of Radiation, Absorption, and Conduction. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 151:1-36.

Tyndall, John (1872) – Contributions to Molecular Physics in the Domain of Radiant Heat: A Series of Memoirs Published in the Philosophical Transactions and Philosophical Magazine, with additions. 446p., Longmans, Green and Co., London.

United Nations (1992) - *United Nations Framework Convention on Climate Change*, 33p.

Upham, Warren (1889) – Probable Causes of Glaciation. *In:* G. Frederick Wright, *The Ice Age in North America and its Bearings upon the Antiquity of Man,* Appendix, pp.573-599, D. Appleton and Company, New York.

USGS (2013) - *The Sun and Climate*. 6p., U.S. Geological Survey Fact Sheet 0095-00

Ussher, James (1650) - Annales Veteris Testamenti a prima mundi origine deducti, una cum rerum asiaticarum et aegyptiacarum chronico a temporis historici principio usque ad Maccabaicorum initia producto. *In:* James Ussher, *The Whole Works of the Most Rev. James Ussher*, vol. VIII, 605p., Hodges & Smith, Londres. Tradução para inglês: Ussher, James (1658) - *The Annals of the Old Testament from the Beginning of the World*. F. Crook and G. Bedell, London, U.K.

Ussher, James (1654) - Tabula in qua Anni Mundi cum annis Periodi Julianae, Annis Aere Christianam, Annis Olympicis et Annis ab Urbe Condita Componuntur juxta Computum Usserianum. *In:* James Ussher, *The Whole Works of the Most Rev. James Ussher*, vol. XI, pp.114-175, Hodges & Smith, Londres.

Valley, John W.; Cavosie, A.J.; Ushikubo, T.; Reinhard, D.A.; Lawrence, D.F.; Larson, D.J.; Clifton, P.H.; Kelly, T.F.; Wilde, S.A.; Moser, D.E.; Spicuzza, M.J. (2014) - Hadean age for a post-magma-ocean zircon confirmed by atom-probe tomography. Nature Geoscience, 7(3):219–223. DOI: 10.1038/ngeo2075.

Wanner, H.; Mercolli, L.; Grosjean, M.; Ritz, S.P. (2014) - Holocene climate variability and change; a data-based review. Journal of the Geological Society, 127(2):254-263. DOI: 10.1144/jgs2013-101

Wheelis, Mark (2002) - Biological Warfare at the 1346 Siege of Caffa. *Emerging Infectious Diseases*, 8(9):971-975.

Whipple, F.J.W. (1934) - On phenomena related to the great Siberian meteor. *Royal Meteorological Society Quarterly Journal*, 60(257):505-513. doi: 10.1002/qj.49706025709

Whymark, A. (2013) - Review Of The Australasian Tektite Source Crater Location And Candidate Structure In The Song Hong-Yinggehai Basin, Gulf Of Tonkin. *44th Lunar and Planetary Science Conference* (2013) paper 1077 (2p.)

Whymark, Aubrey (s/d) - Introduction to the Australasian Strewnfield and Tektite Formation. *In: www.tektites.co.uk*

Wilde, S.A.; Valley, J.W.; Peck, W.H.; Graham, C.M. (2001) - Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4 Gyr ago. Nature 409(6817):175–78. DOI: 10.1038/35051550.

Williams, Jonathan P. (2010) - The astrophysical environment of the solar birthplace. Contemporary Physics, 51(5):1–18. DOI: 10.1080/00107511003764725

Wolf, Rudolf (1889a) - Beobachtungen der Sonnenflecken im Jahre 1888, sowie Berechnung der Relativzahlen und Variationen dieses Jahres, und Mittheilung einiger betreffender Vergleichungen; Besprechung der neuesten Untersuchungen von Herrn Professor Dr. Spörer über die Wanderung der Fleckenzonen; Fortsetzung der Sonnenfieckenliteratur. *Astronomische Mittheilungen*, 73:75-130

Wolf, Rudolf (1889b) - Versuch einer Bestimmung der grossen Sonnenflecken- periode; Studie uber das sog. Petersburger-Problem; Fort- setzungen der Sonnenfleckenliteratur und des Sammlungsver- zeichnisses. *Astronomische Mittheilungen*, 74:131-162,

Wright, G. Frederick (1889) – *The Ice Age in North America and its Bearings upon the Antiquity of Man*. 620p., D. Appleton and Company, New York.

Zachos, James; Pagani, M.; Sloan, L.; Thomas, E.; Billups, K. (2001) - Trends, Rhythms, and Aberrations in Global Climate 65 Ma to present. *Science*, 292(5517):686-693. DOI: 10.1126/science.1059412

Zeng, N. (2007) - Quasi-100 ky glacial-interglacial cycles triggered by subglacial burial carbon release. *Climate of the Past*, 3:135–153. doi:10.5194/cp-3-135-2007

Origem das figuras

A maior parte das figuras foi especialmente preparada para ilustrar este texto. Várias foram extraídas, adaptadas ou construídas com dados das fontes a seguir indicadas.

Figura II.1 - Imagem adaptada do web site da NASA http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA00452

Figura II.2 - Modificado de Taylor & McLennan (1996) e Rosing *et al.* (2010).

Figura II.3 - Créditos da imagem: *SOHO/ESA/NASA/NRL*

Figura II.4 - Adaptado de Bahcall *et al.* (2001).

Figura II.5 - Construída principalmente com base em Bahcall *et al.* (2001), Sackmann & Boothroyd (2003), Rosing *et al.* (2010) e Ross (2011).

Figura II.12 - Construída principalmente com base em Berger, A.; Loutre, M.F. (1991)

Figura II.13 - Adaptada de Fix (2010).

Figura II.14 - Adaptada de Milankovitch (1941).

Figura II.15 - Construída a partir de vários trabalhos, entre os quais Berger *et al.* (1999), Berger & Tricot (2012); Elkibbi & Rial (2001), Hays *et al.* (1976), Muller & MacDonald (1997), Shackleton & Opdyke (1973), Shackleton *et al.* (1990); Zachos *et al.* (2001) e Zeng *et al.* (2007).

Figura II.16 - Adaptada de Muller & MacDonald (1997)

Figura II.17 - A) Imagem extraída do web site da SOHO (Solar & Heliospheric Observatory). B) Imagem adaptada do web site da NASA dedicada ao SOHO.

Figura II.18 - Imagens adaptadas de figuras existentes na web page do Solar Physics Group do Marshall Space Flight Center da NASA.

Figura II.19 - Construída com dados disponíveis na web page do Solar Physics Group do Marshall Space Flight Center da NASA.

Figura II.20 - Adaptada de figuras de USGS (2013) e de Damon & Sonnet (1991)

Figura II.21 - Adaptada de figuras de USGS (2013)

Figura II.23 - Modificada de Baker *et al.* (2015)

Figura II.24 - Modificada de Luterbacher *et al.* (2016)

Figura II.25 - Extraída e adaptada de Jones *et al.* (2006) e Board on Atmospheric Sciences and Climate (2006)

Figura II.26 - Adaptado da Alcoforado 2000

Figura II.27 - Modificado de Giuli *et al.* (2014), Whymark (s/d) e outras fontes.

Figura II.28 - Extraído e adaptado de: A - Heidelberg University (2016); B e C – Prasad *et al.* (2010); D e E – Rochette *et al.* (2008).

Figura II.29 - Vista aérea da cratera de Barringer extraída de Britannica *Kids*; foto *D.J. Roddy / U.S. Geological Survey*. Imagem do meteorito de Holsinger extraída de Wikimedia Commons; Autor: Mario Roberto Duran Ortiz.

Figura II.30 - Adaptada da figura 1 de Kinzie *et al.* (2014)..

Figura II.31 - Extraído de Wikimedia Commons (File: Robeso2.jpg). Autor: Swampmerchant at English Wikipedia

Figura II.32 - Fotografia da esquerda extraída de "The Tunguska Impact--100 Years Later" do web site Nasa Science – Science News. Fotografia aérea da direita retirada da "Tunguska Home Page" do Departamento de Física da Universidade de Bolonha. O crédito de ambas as fotografias é de Leonid Kulik.

Figura II.33 - Fotogramas adaptados de vídeos disponíveis no YouTube.

Figura II.34 - Imagem da direita extraída do web site do Sunday Express do artigo "UK escaped Russian meteor annihilation 'by a matter of hours", de Charlotte Meredith, de 18 de Fevereiro de 2013. Imagem da esquerda extraída do web site do National Geographic, do artigo "Giant Chunk of Russian Meteor Recovered", de Andrew Fazekas, de 18 de Fevereiro de 2013.